



TITLE:

面発光機能素子の開発とその応用 に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

小坂, 英男

CITATION:

小坂, 英男. 面発光機能素子の開発とその応用に関する研究. 京都大学,
1999, 博士(工学)

ISSUE DATE:

1999-09-24

URL:

<https://doi.org/10.11501/3157418>

RIGHT:

面発光機能素子の開発と
その応用に関する研究

小坂 英男

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	4
1.1.1 短距離データ伝送の重要性	4
1.1.2 面発光レーザの特徴と問題点	5
1.2 本研究の目的	11
1.3 本論文の構成	13
第2章 メサ光閉じ込め型面発光レーザの光モード制御及び高周波変調	16
2.1 まえがき	16
2.2 基本素子構造	17
2.3 一次元（発振方向）構造解析	20
2.3.1 解析手法及び構造パラメータ	20
2.3.2 発振閾値	24
2.3.3 外部微分量子効率	27
2.3.4 戻り光雑音の及ぼす影響及び考察	29
2.4 二次元（円筒座標）構造解析	34
2.4.1 構造モデル及び構造パラメータ	34
2.4.2 解析手法	35
2.4.3 解析結果及び考察	37
2.5 三次元（全方位）構造解析	41
2.5.1 構造モデル、構造パラメータ及び解析手法	41
2.5.2 解析結果及び考察	41
2.6 素子特性	44
2.6.1 基本諸特性	44
2.6.2 高周波変調特性	49
2.7 まとめ	56

第3章 面発光レーザの光機能素子化	57
3.1 まえがき	57
3.2 面入出力光電融合素子（VSTEP）	57
3.3 VCSEL 型 VSTEP（VC-VSTEP）	62
3.3.1 LED 型 VSTEP との比較	62
3.3.2 垂直共振器構造による吸収増大効果	63
3.3.3 吸収波長域とレーザ発振波長の一致	66
3.4 二重共振器型受光素子と単一共振器型面発光レーザ分離構造	70
3.4.1 二重共振器型受光素子の動作原理及び設計指針	71
3.4.2 素子構造	73
3.4.3 素子特性及び考察	75
3.5 二重共振器型フォトランジスタと VC-VSTEP との一体化構造	79
3.5.1 素子構造と作製工程	80
3.5.2 素子特性	83
3.6 面発光機能素子の機能性光接続応用	88
3.7 まとめ	89
第4章 面発光レーザの並列データ伝送への応用	90
4.1 まえがき	90
4.2 2次元 VCSEL アレイ並列伝送モジュール	90
4.2.1 モジュール構造	92
4.2.2 実装工程	95
4.2.3 モジュール特性	100
4.3 イメージファイバによる高密度並列光データ伝送	108
4.4 大口径プラスチッククラッドファイバによる光データ伝送	114
4.5 まとめ	119
第5章 面発光レーザの光スイッチへの応用	120
5.1 まえがき	120
5.2 分散型ファイバスイッチによる光回路網	120

5.3 チャンネル選択型 VCSEL	123
5.3.1 素子構造	123
5.3.2 素子特性	126
5.4 伝送特性	128
5.5 まとめ	129
謝辞	132
参考文献	134
本研究に関連する発表	145

第 1 章 序論

1.1 本研究の背景

1.1.1 短距離データ伝送の重要性

光エレクトロニクスの代表選手とも言うべき半導体レーザは、光通信、光記録・再生、計測、加工、医療と実に広範な分野で活躍し、私たちの生活に大きく貢献している。中でも光通信への応用は最も歴史の古いもので、光ファイバの出現とも同期してすさまじい速度で発展を遂げてきた。特に長距離間の通信に使われる幹線系通信の伝送容量の需要増大にともない、半導体レーザの高速化への要求は留まるところを知らない。研究段階では既に 100 Gb/s あるいは 1 Tb/s といった領域が照準になってきており、主に時間軸での大容量化の追求がこれまで盛んに進められてきた。

その一方で、光通信の末端への浸透ということが昨今盛んに言われており、これまで中心であった幹線系から末端に位置する加入者系や、さらには図 1.1に示すような機器間、装置間といった距離の短い分野への光通信の導入も期待されるようになって

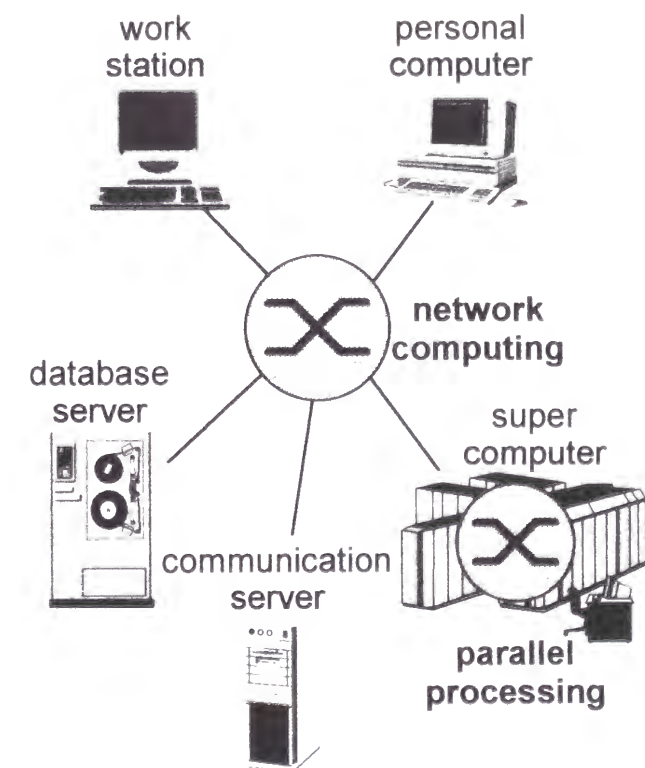


図 1.1 短距離データ伝送の応用例

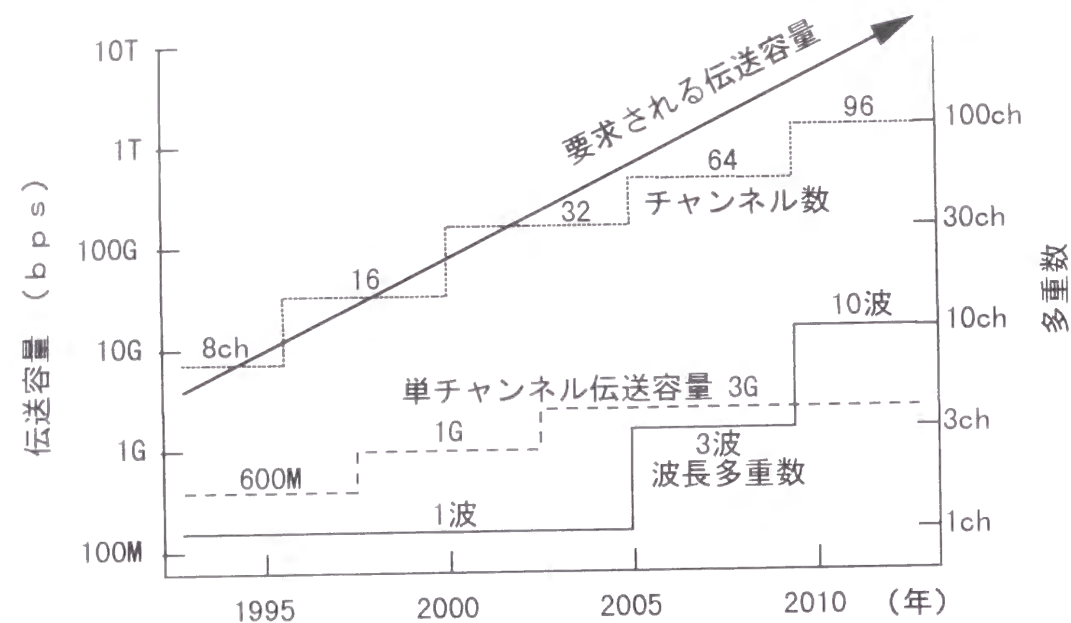


図 1.2 短距離データ伝送への大容量化要求の将来予測と対応策

きた。特にコンピュータの動作速度が急速に向上してきたことから、およそ図 1.2 に示したような伝送容量が特にスーパーコンピュータの架間接続などの場面で期待されており、2010 年にはこれが 3 Tb/s にも達すると予測されている。このような短距離応用では、価格に対する要求が極めて厳しく、必然的に並列伝送への要求が強くなってくる。300 Gb/s 程度までは時間軸及び空間軸での多重化だけで対応可能かと思われるが、それ以上の領域では波長（周波数）軸をも有効に組合せ、光の利点を十分に使いこなしたハイブリッド伝送方式の開発が必要と考えられる。

1.1.2 面発光レーザーの特徴と問題点

このような大容量化の要求に答えるため、半導体レーザーの高速化、高機能化、低コスト化が進められ、多くの研究者の努力により短距離通信の分野にも半導体レーザーの利用が浸透しつつある。現在までに実用化されている半導体レーザーは、いずれもレーザー光を半導体基板と平行に素子端面部分から放出させる“端面発光レーザー”であり、この枠組みの中で懸命な性能向上の努力が続けられてきた。しかしながら、この端面発光レーザーは以下のような解決すべき重大な問題を抱えている。

- 1) 素子長が数 100 μm と大きく端面から光出射するめ、高密度に作製できず特に 2 次元状の集積は不可能である。

- 2) 素子を切り出した後に個別に端面加工処理、特性検査、選別を行う必要があるため自動化に不向きで、歩留まりや低コスト化に限界がある。素子面積が大きいことも成長欠陥による歩留まり劣化の原因となる。
- 3) 電子回路とのモノリシック集積が困難で、大規模な光回路の構成が不可能である。
- 4) 垂直方向に対して水平方向の光閉じ込めが弱く、結果的に出射光が楕円状となるため光ファイバとの光結合が取り難く、収差等の問題が生じる。

将来、短距離データ伝送への大容量化の要求のみならず、加入者系への光ファイバ通信の導入や大容量光ディスクメモリ、光並列処理、高性能光センサ用の光源としての需要などを含めて考えると、半導体レーザーの量産化や高性能化がますます重要になり、上記問題の根本的解決が必要となる。

このような従来の半導体レーザーの抱える問題を解決するべく生まれたのが面発光レーザーである。面発光レーザーと呼ばれるものには、レーザー共振器構造の観点から、以下の 3 種類に大別される。

- 1) 垂直共振器型面発光レーザー
- 2) 水平共振器型面発光レーザー
- 3) 曲がり共振器型面発光レーザー

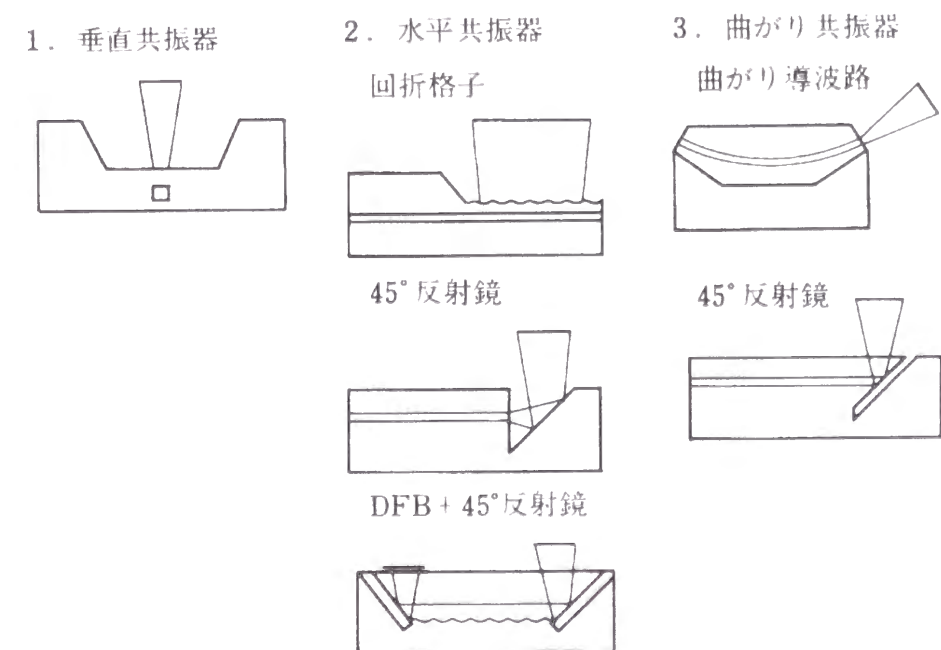


図 1.3 面発光レーザーの種類

(1) はレーザ共振器を基板と垂直方向に構成するもので、本論文ではこの構成を採用している。本論文ではこの構成を VCSEL (vertical-cavity surface-emitting laser) と略称する。図 1.4 にその基本的な構造を示す¹⁾。(2) は従来の端面発光レーザと同様、半導体基板と平行にレーザ共振器を構成し、回折格子あるいは 45° 反射鏡を用いて外部で折り曲げて基板と垂直方向に光を取り出す構造である^{2) - 6)}。このうち回折格子を用いた方法には回折格子を直線状に構成するもの^{2)・6)}と円形状に構成するもの⁷⁾とがある。特に精力的に研究の進められている円形状回折格子埋め込み型面発光レーザの構造を図 1.5 に示す。(3) は共振器内部に (2) と同様の立ち上げ機構を形成することにより、基板と垂直方向に光を取り出す構造である⁷⁾。以下本論文で面発光レーザと呼ぶとき、特に断りのない限り VCSEL を指すものとする。

面発光レーザは最初 “area-emitting laser” として東工大の伊賀健一らによって 1977 年に提案された。その後、同グループによって “面発光レーザ (surface-emitting laser)” と命名され、1979 年には電流注入でのレーザ発振が初めて確認された¹⁾。このときの面発光レーザは、波長 1.3 μm 帯の GaInAsP/InP 系材料を用いており、温度 77 K におけるハルス動作で発振閾値電流は 700 mA であった。これを閾値電流密度で表すと 44 kA/cm² であり、現在の数百 A/cm² と比較して 2 桁程度も大きいものであった。

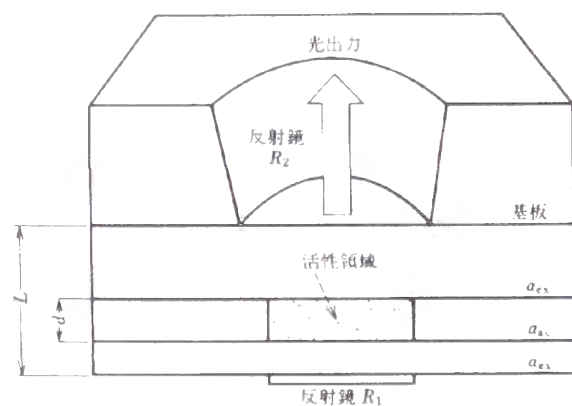


図 1.4 垂直共振器型面発光レーザの基本構造

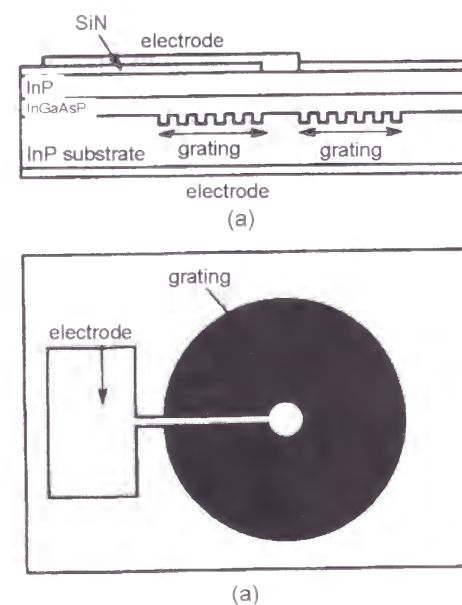


図 1.5 円形状回折格子埋め込み型面発光レーザの概略構造
(a) 側面図 (b) 上面図

その後、ベル研究所の J. L. Jewell や Y. H. Lee ら^{8) - 11)} が波長 0.98 μm 帯の InGaAs/GaAs 系材料で初めて VCSEL を実現し、顕著な特性改善を行った。AlAs/GaAs 交代多層膜を用いた反射鏡により 99.9% と高い反射率を得たことが、特性改善につながった。さらに活性層として圧縮歪みを導入した In_{0.2}Ga_{0.8}As 単一量子井を使用し、閾値電流密度を 1.8 kA/cm² にまで低減した。この成功の後、この構造の研究が爆発的に増え、VCSEL 研究が盛んとなった^{12) - 25)}。成功の主な理由を整理すると、以下ようになる。

- 1) InGaAs を活性層としたときに得られる発振波長 9800 Å 付近において、GaAs と AlAs という大きく屈折率の異なる材料の組み合わせを多層反射膜として利用できること
- 2) InGaAs 活性層の温度特性が他の材料に比べて格段に優れていること
- 3) 格子整合基板として GaAs が使用でき、これがレーザ光をほとんど吸収なく透過すること

幹線系通信に使用されている長波長帯 (1.3/1.55 μm) では上記条件、特に 1) の高屈折率差材料を格子整合系で見出すことが困難である。このため、基板貼り合わせなどの方法がとられているが、現在のところ信頼性まで含めて実用に耐えるものは得られていない。

端面発光レーザと比較した VCSEL の利点を以下に整理する。

- (1) 安定性、均一性、波長制御性に優れている

素子寸法を波長程度まで微小化でき、縦、横両モードがほぼ完全に単一モード化された安定な発振が可能である。また、発振波長が多層膜反射鏡により決まるため、波長制御が容易で特性の安定化、均一化が図れる。また、基板中で素子の占める割合が小さいため、成長欠陥等による不良率が減少し、高歩留まりが望める。

- (2) 大規模集積化が可能

素子寸法が大きくとも数 10 μm 角と微小なため、2 次元状に高密度に並べるこ

可能であり、大規模集積化に有利である。また電子回路との集積にも向いている。

(3) 作製工程の自動化が容易

結晶成長から無反射処理までの作製工程、検査、選別が一環して基板上で行えるため全工程に渡る自動化が容易で、単体素子のみでなく大規模集積化しても十分な高歩留まり、高収率が期待できる。

(4) 光ファイバとの結合が良好

光出射形状が円形で放射角を小さくとれるため、光ファイバとの結合が良好である。また、レンズによる集光時にも収差による問題が全くなく、CD のヒックアップ応用などにも有効である。

端面発光レーザは上述のように端面発光レーザに対して大きな利点を持つ。ところが素子寸法が波長程度まで小さくなったため、当初の VCSEL には逆に以下のような問題点があった。

- 1) 多層反射膜を介して電流が注入されるため、素子抵抗としてこの多層反射膜分の寄与が大きい。この多層反射膜は屈折率の大きく異なる材料を交互に重ねあわせたものであり、各層間に生じるポテンシャル障壁が高抵抗の要因となる。この素子抵抗の上昇は動作電圧や消費電力の上昇などの特性劣化をもたらす。
- 2) そもそも端面発光レーザに比べて素子が極端に小さく、抵抗は素子面積にほぼ逆比例して増加する。ところが通常の実装法では 100 μm 角程度の電極ヘッドが必要であり、寄生容量を素子面積に比例して低減できるわけではない。したがって抵抗と容量の積で決まる周波数特性は、端面発光レーザより劣化することになる。
- 3) 活性体積が小さく局所的な温度上昇が生じるため、単体素子での光出力に限界がある。

短距離データ伝送として見た場合、幹線系の光通信に要求される程の高速性や高出力は必要なく、むしろ低消費電力への要求が強い。したがって、上記問題点のうち、1 番目の素子抵抗の低減が最も重要な課題である。また、光情報処理や大容量データ

伝送を行う上で必要となる機能集積化や大規模集積化を図ることも重要である。

現在までに報告されている短距離光データ伝送用の並列光伝送モジュールを表 1.1 にまとめた。日本国内を中心に依然として端面発光レーザの利用が残っているが、米国を中心として VCSEL を用いたものが主流となっている。中でも OETC (IBM を中心とする)、POLO (HP を中心とする)、OptoBus (Motorola) 及び NEC が中心となり先端的なモジュール開発を進めてきた。これらのモジュール構造については第 4 章に詳述する。

表 1.1 並列光伝送モジュールの主な報告例

	OETC POINT	IBM (Jitney)	HP (POLO)	Motorola (OptoBus)	Vixel (PVL)	OPTOBAHN	Siemens (PAOLI)	日立	富士通	NEC	NEC
発光素子	VCSEL	VCSEL	VCSEL	VCSEL	VCSEL	EELD	EELD	EELD	EELD	EELD	VCSEL
スループット (Gbps/ch)	16	10	8	8	7.5	10	12	3	12	8.8	16
チャンネル数	32	20	10	10	12	10	12	12	20	8	16
伝送速度 (Mbps/ch)	500	500	800	800	625	1000	1000	250	622	1100	1000
ファイバ タイプ	MMF	MMF	MMF	MMF	MMF	MMF	MMF	SMF	SMF	MMF	MMF
コネクタ タイプ	MACⅢレセ プタクル		MT プッシュプル	MT レセプタクル	MT ピグテール		MTアクティブ コネクタ	MT ピグテール		MT ピグテール	MT プッシュ プル

EELD： 端面発光レーザ (edge-emitting laser diode)

MMF： マルチモードファイバ (multi-mode fiber)

MAC： 規格名 (multifiber array connector)

MT： 規格名 (Mechanically Transferable)

1.2 本研究の目的

本研究は、面発光レーザの持つ上記問題点を解決し、光データ伝送あるいは光集積に適した良好な特性を持つ面発光レーザを作製することと、光情報処理を行う上で必要な受光、スイッチ、メモリ、増幅等の要素機能の集積化とその最適化を行うことを目的とする。また、実際の伝送系に適用するために不可欠なモジュール化と、光スイッチへの応用を提案することも本研究の重要な目的である。以下、順に説明する。

1) 素子特性の向上

VCSEL のレーザとしての基本特性である発振閾値電流、外部微分量子効率、変調特性の向上を図ることが重要である。この際、前節で挙げた素子抵抗上昇の問題点を回避する工夫が必要である。また、端面発光レーザでは縦モードの安定性に多くの労力が払われて来たのに対して VCSEL では横モードが不安定となり易く、これを安定化することも重要である。

2) 光情報処理要素機能の付加

VCSEL の利点として電子回路との整合性を挙げたが、実際に VCSEL を用いた光機能素子をモノリシック集積した例は少なく、これを示していくことが本研究の主要な目的である。特に、光情報処理の基本要素となる発光、受光、スイッチ、メモリ、増幅等の機能を一つの素子に融合し、これらの特性を同時に最適化していくことを主目的とする。

3) 2次元並列伝送モジュールの実現

並列光伝送への要求は既に1次元アレイでは不可能な領域に達している。ところが、本来2次元集積化を得意とするはずの VCSEL でも、実際に使用し易い形で2次元モジュール化を図った例はなく、VCSEL の有効性を示すためにもこれを早急に実現する必要がある。

4) 光スイッチへの応用

光データ伝送以外の応用として重要なものの一つに光スイッチがある。通信速度の向上に伴い、スイッチ自体への負荷が高まり、データ伝送を律速している。特に Gb/s を超える領域では信号を電気的に変換して伝送する今のスイッチ構成で

は限界が明らかとなっている。VCSEL の集積化の特性を生かすことによって、電気に変換することなく、光のままで大量のデータをスイッチし伝送する構成が可能と考えられる。このような提案は、半導体レーザ応用の裾野を広げる意味でも重要である。²⁶⁾

1.3 本論文の構成

本論文は序論及び結論を含む6章と謝辞、参考論文、発表リストから構成されている。以下に各章の概要を述べる。

〔第2章〕メサ光閉じ込め型面発光レーザの光モード制御と高周波変調

面発光レーザでは従来の端面発光レーザとは逆に共振器方向には単一モード化が容易で、横方向には困難である。必要とする活性領域以外を切り落とした高メサ（ハイメサ）型が全方向単一モード化の唯一の方法であったが、この方法では電流を抵抗の高い多層膜反射鏡（distributed Bragg reflector, DBR）を通して注入することになり、駆動電圧が非常に高くなるという問題があった。この様な問題の解決を図るため本研究では活性層上までに留めたメサ部で光閉じ込めを行い、活性層上に残した数周期分のDBRの横方向から電流注入を行う構造を新たに考案した。本構造では優れた単一モード特性が得られる反面、共振器内部の光モード分布はポストの寸法と残留DBR数に極めて敏感であり、これを正確に設計、制御する必要がある。本章ではこの設計論と実際の作製方法について具体的パラメータを示しながら説明し、その結果得られた実用上重要な諸特性の改善結果について述べる。設計論では、特に3次元的な構造解析を必要とする光モード制御による構造最適化を、また特性としては高周波実装まで含めた高周波変調特性について議論する。

〔第3章〕面発光レーザの光機能素子化

本章では前章の面発光レーザをより発展させて、発光、受光、スイッチ、メモリ、増幅等の光情報処理に必要な機能をモノリシックに集積した面型光機能素子について述べる。本素子は光情報処理に必要な要素機能をすべて兼ね備えているので、スマートピクセルとも呼ぶ。特に共振器構造を多重共振器化することにより、面発光レーザの層構造を共有しながら、受光素子としての効率及び帯域特性をも同時に改善できることを初めて見出した。これにより従来の光変調器型光機能素子の特性を格段に向上することができた。本構造はほぼ同時に研究が盛んとなった共振型受光素子の研究に先行するものである。さらに、設計次第では今後の波長多重通信への応用で必要となる波長選択性を、多波長で自由に設計可能となる点でも重要である。本章では、設計、作製法から特性に至るまでを具体的に示し、高周波変調の可能性まで含めて議

論する

〔第4章〕面発光レーザの並列データ伝送への応用

本章では面発光レーザの重要な応用の一つである光データ伝送応用について述べる。面発光レーザの特徴は単体レーザとしての良好な特性にとどまらず、二次元面内配列とその稠密配置の可能性にある。しかしながら、この重要な特徴を積極的に生かした例はこれまでになかった。本研究ではこの二次元性を生かしながらも、光ファイバとの一括自導位置合わせ（セルフアライメント）が可能な構造を初めて考案し、プラスチック整形技術を用いて実証を行った。また、この二次元集積性を極限まで追求した例としてイメージファイバによる二次元一括並列伝送を考案し、将来の超高密度並列光信号伝送の基礎的可能性を実証した。さらに、面発光レーザの一般家庭への普及を目指した大口径プラスチッククラッドファイバによる簡易伝送モジュールについても、先駆的な研究を行った結果を述べる。

〔第5章〕面発光レーザの光スイッチへの応用

本章では面発光レーザのもう一つの重要な応用である光スイッチ応用について述べる。前章の光データ伝送は単なる一対一の伝送であるが、実際の光データ伝送網を構成するには各接点において光信号を切り替える必要がある。また、コンピュータの光化を図る上でも光路選択の機能なくしては単なる電気配線の置き換えに過ぎない。本研究では面発光レーザの高集積性に着眼し、伝送チャンネルを送信側で切り替えることにより光路選択を可能とした。本方法は伝送路の障害対策向けクロスコネクタへの応用も考えられ、面発光レーザの市場を格段に広げる可能性を持つ。さらに完全結合網（フルクロスバ）型の伝送線路構成で多対多の双方向光データ伝送網が構成可能であることを初めて提案し、実際の試作を通して実証を行った。

〔第6章〕結論

本研究で得られた主要な結果を総括し、今後の展望を述べる。

本論文の構成と各章の関係を図1.6に示す。

第 2 章 メサ光閉じ込め型面発光レーザの光モード制御
及び高周波変調

2.1 まえがき

レーザ発振の安定性の観点から、単一モード化は重要な課題である。VCSEL は、DBR で共振器を構成するために、縦モードの単一モード性は極めて良い。一方、横モードについては一般的にモード制御が困難で、特別な設計が必要となる。VCSEL の構造には大きく分けて“利得導波型”と“屈折率導波型”の 2 種類がある。“利得導波型”は、イオン注入などの手段で電流注入領域を制限することによって利得の空間分布を作り出し、これにより実効的に光を閉じ込める構造である²⁷⁻²⁹。この構造では、電流注入領域が大きくなるため横モードが安定せず、また発振閾値電流も低減できないなどの問題がある。一方の“屈折率導波型”としては、活性領域以外を切り落としたハイメサ構造が考えられ、これにより横モードの制御性と安定性が格段に向上された^{30, 31}。その反面、電流を抵抗の高い DBR を通して注入することになり、駆動電圧が非常に高くなるという問題がある³²。そこで本研究ではメサを上部 DBR の一部に留め、活性層上に残した数周期分の DBR の横方向から電流注入を行う横注入構造を採用した。光閉じ込めはメサ部の実効的な屈折率分布で行われるため、“メサガイド型”あるいは“リッジ導波型”と呼ぶことができる。本構造では優れた単一モード特性が得られる反面、共振器内部の光モード分布はメサの寸法と残留 DBR 数に極めて敏感であり、これを正確に設計、制御する必要がある。同様の構造を採用した Y.M. Lee らは、上部 DBR を中間層までの深いメサを形成しなくては屈折率導波による光閉じ込めが殆どなく、単一横モード化に必要な $6\text{ }\mu\text{m}$ 以下のメサ寸法では発振閾値の急激な上昇が生じると報告し、高反射率の DBR によりメサ部への光しみ込み

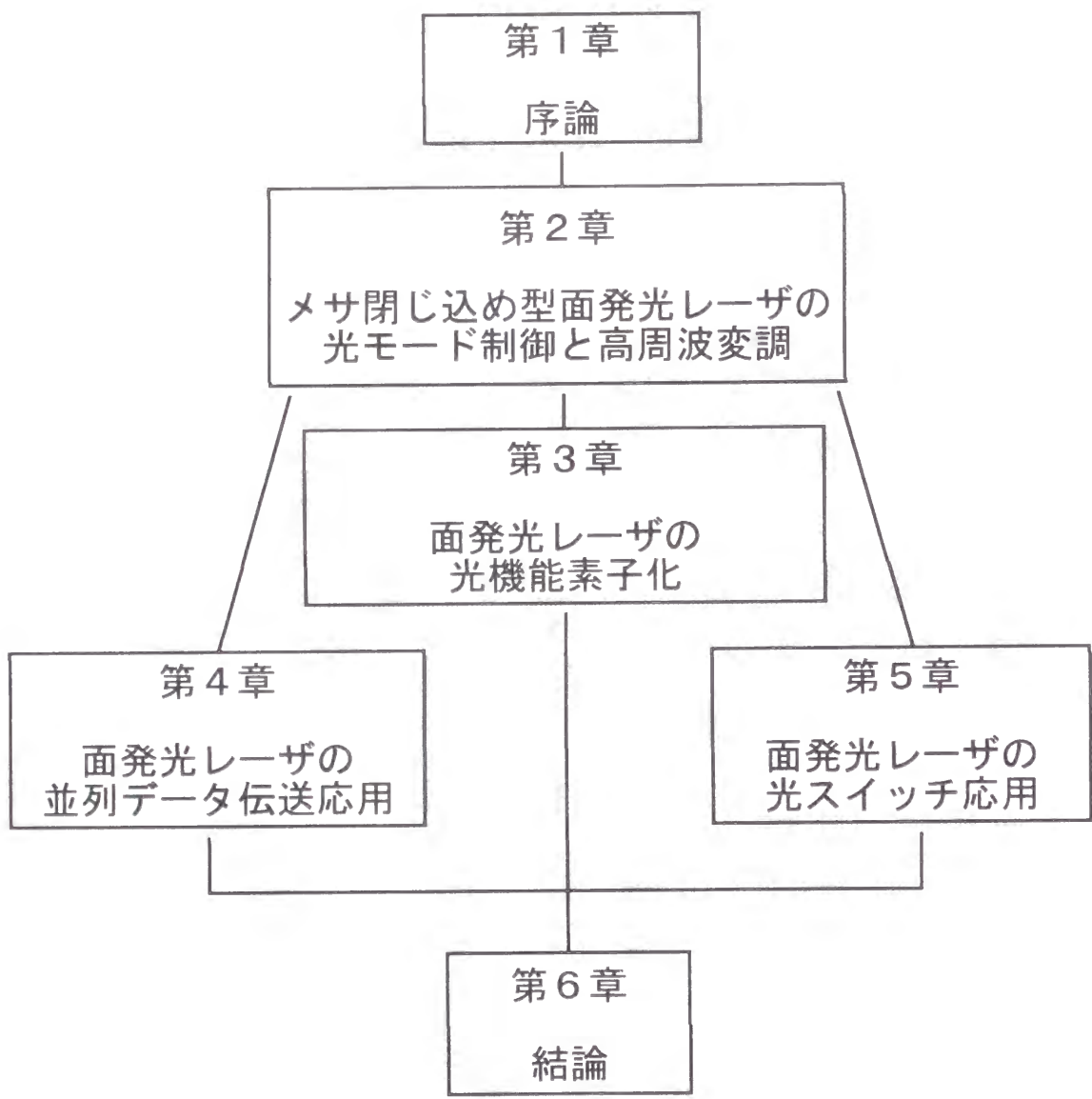


図 1.6 本論文の構成

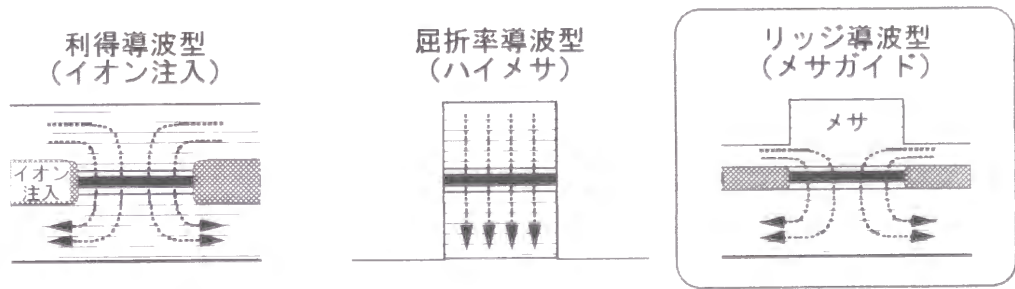


図 2.1 従来の VCSEL と本研究の VCSEL の概略構造比較

が少ないためであると説明した³³。これに反し筆者は十分良好なメサ光閉じ込めが可能であることを示した。本章ではその設計論と作製方法について具体的パラメータを示しながら説明し、その結果得られた諸特性を示す。さらに VCSEL 単体の変調特性とアレキサンダー実装時の高周波変調特性についても述べる。

2.2 基本素子構造

最初に本 VCSEL の基本構造を示す。発振波長、光閉じ込め構造、電流狭窄構造等の異なる様々な種類の VCSEL が提案されているが、温度特性、信頼性等の観点から図 2.2 に示す様な InGaAs (インジウムガリウム砒素) を活性層とするメサ光閉じ込め型 VCSEL 構造を採用した。電流狭窄はプロトンイオン注入による高抵抗領域により、また光閉じ込めは陽極側のメサ部により得られる。発振波長は $0.98\ \mu\text{m}$ 帯で GaAs (ガリウム砒素) 基板を透過して裏面方向に垂直に出射される。従来のハイメサ構造では、

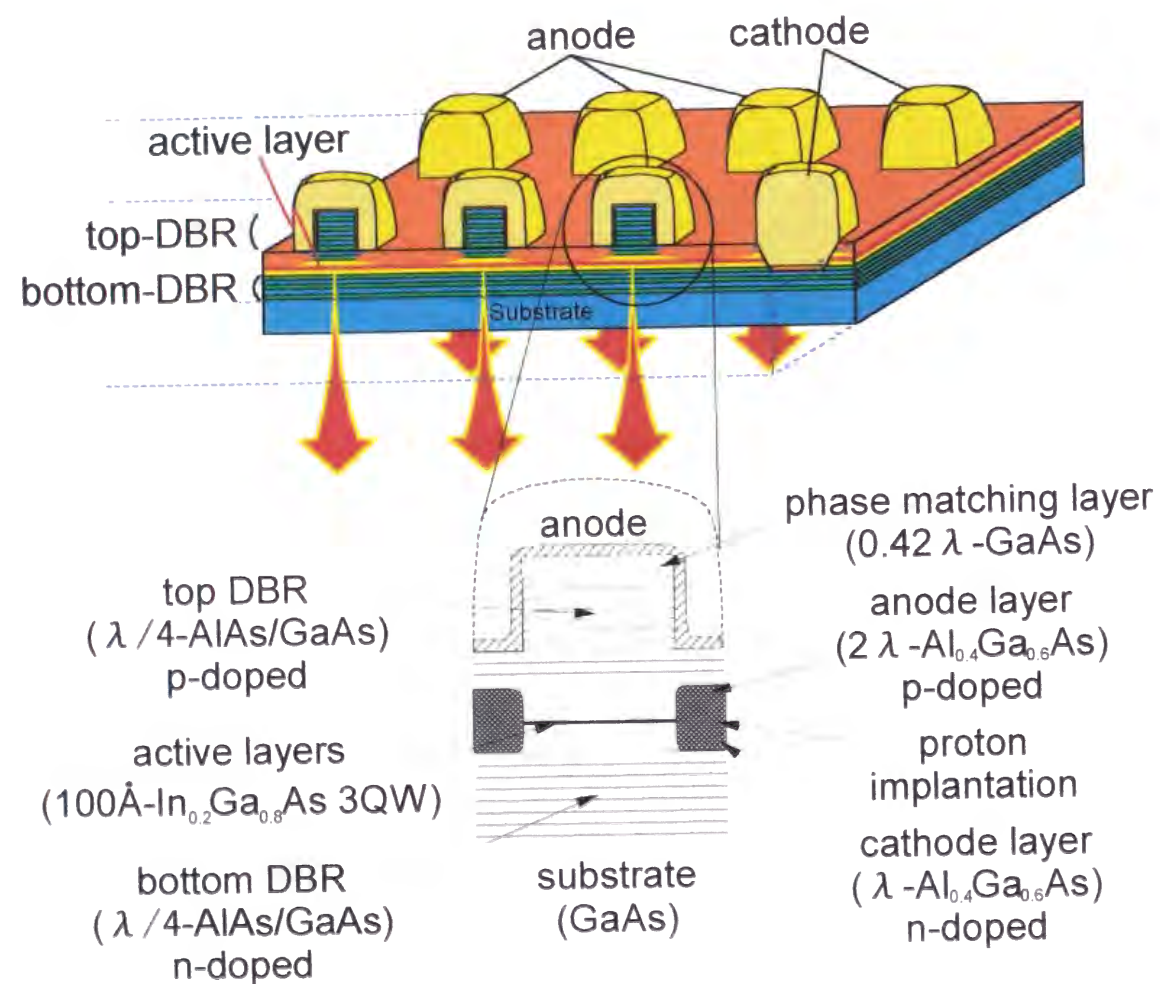


図 2.2 VCSEL の基本構造

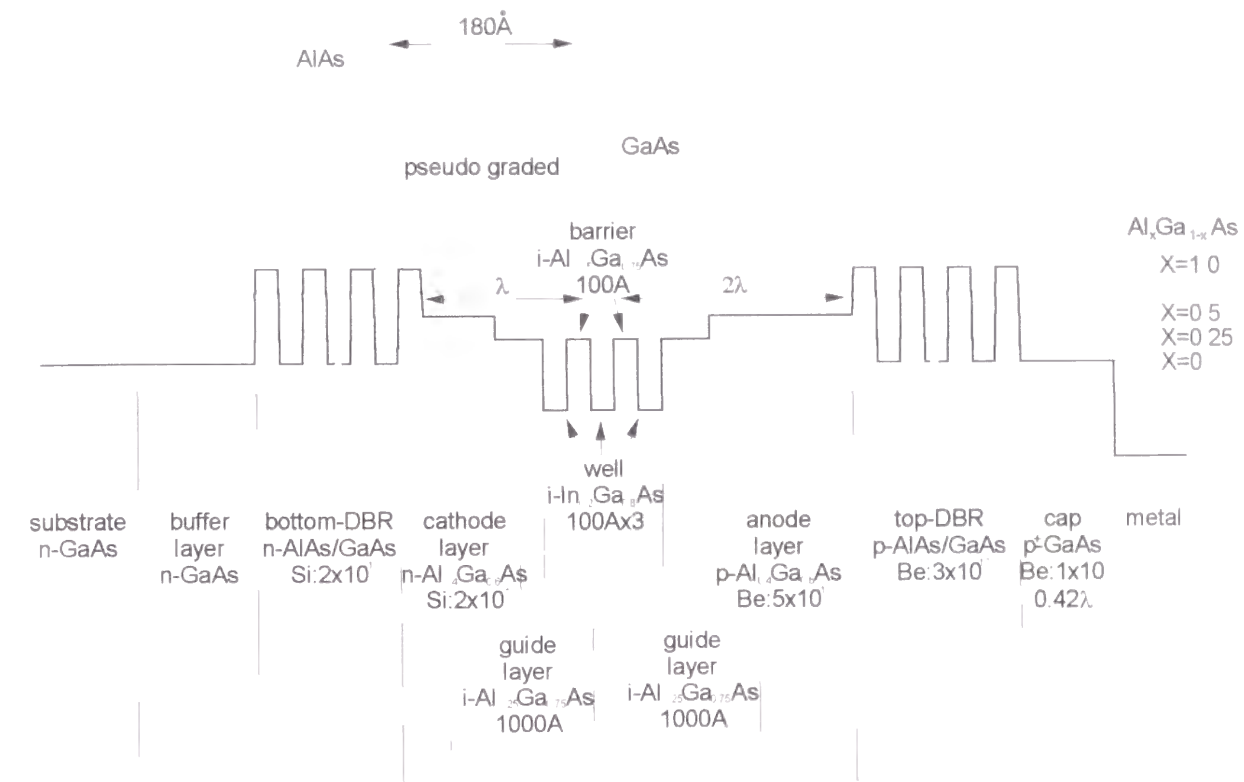


図 2.3 VCSEL のバンド構造図

DBR を電流通路とするため素子寸法 (メサ上面の直径あるいは一片の長さ) を小さくしていくと抵抗が増大し、発振閾値も活性層側面での非発光再結合電流の影響³⁴が素子寸法に比例して小さくならないという問題点があった。そのために DBR を通過させずに横方向から電流注入できるようにメサを上部 DBR の途中までとし、横方向から電流注入可能な構造としてある。この構造ではリッジ型半導体レーザと同様の原理で、屈折率導波型の高効率な光閉じ込めが生じる。

具体的な層構造を図 2.2 の構造図及び図 2.3 のバンド図を参照しながら説明する。全ての層構造は n 型 GaAs 基板上に形成された n 型 GaAs バッファ層の上に成長されている。活性層は、非ドープの $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 歪量子井戸からなり、その両側にそれぞれ $\lambda/4$ 厚 (λ は媒質内共振波長) の AlAs と GaAs を交互に積層した DBR が形成されており、上下 DBR とともに AlAs から始まり AlAs で終わる奇数の層数となっている³⁴。上部 (結晶成長側) の DBR は、p 型ドープ ($\text{Be}: p = 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)、下部 (基板側) の DBR は n 型ドープ ($\text{Si}: n = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) となっている。p-AlAs と p-GaAs 層の境界部には、急峻な界面によって生じる抵抗を低減するために、疑似組成傾斜 (グレーデッド) 構造を導入してある³⁵。InGaAs 活性層は厚さ $100\ \text{\AA}$ の歪量子井戸層、3 層

からなり、非ドープの $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ 障壁層 100 \AA を挟んでいる。活性層近傍 $0.1 \mu\text{m}$ の領域は、量子井戸活性層でのキャリア捕獲による影響を避けるための閉じ込め層として非ドープ構造としてある。その上には $\text{p-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ よりなる陽極層 (2λ 厚, Be ドープ, $p = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) が、下には $\text{n-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ よりなる陰極層 (λ 厚, Si ドープ, $n = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) が形成されている^[36]。最上層にはキャップ層として $\text{p}^+\text{-GaAs}$ (0.42λ 厚, Be ドープ, $p = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) が形成されているが、陽極金属による反射の効果的に利用するために金属反射の位相ずれを考慮して厚さを 0.42λ とした位相補正層を兼ねている。上下の DBR の間隙 (中間層) は 3λ としてあり、活性層は定在波の腹の位置に来るように下部 DBR から λ の位置に形成されている。設計共振波長は多層膜の屈折率・吸収係数の波長依存性を考慮して $0.98 \mu\text{m}$ とした^[37]。

次に本 VCSEL の加工工程を図 2.4 に示す。まず (a) で陽極 (アノード) となる部分をパターンニングし、ドライエッチング後 (b) のように上部 DBR を 4 層残してメサ部を形成する。次に (c) でパッシベーション用の SiN 膜を全面に形成し、(d)

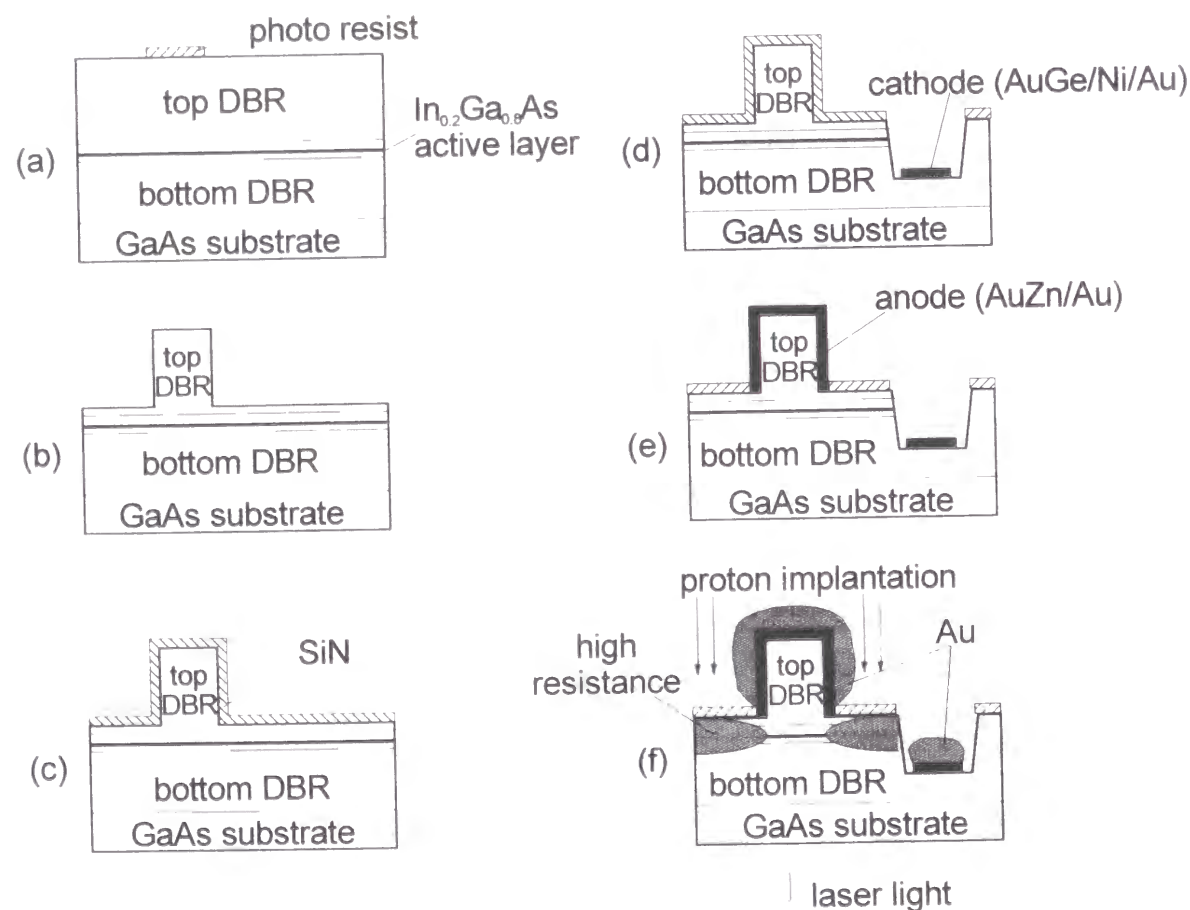


図 2.4 VCSEL の加工工程

で陰極 (カソード) となる部分だけ SiN 膜をフッ酸に浸すウェットエッチングにより除去し、基板までエッチングした後にカソード用金属 (AuGe/Ni/Au) を蒸着し、熱処理する。次に (e) でアノード部のみの SiN 膜を除去しアノード用金属 (AuZn) を蒸着する (熱処理はしない)。この後 Ti/Au をスハッタにより全面に蒸着し、アノードおよびカソード部のみにメッキにて Au を $1 \mu\text{m}$ 程度形成する (f)。このメッキ部をマスクとしてプロトンイオン注入により高抵抗領域をセルフアライン形成し、さらに実装用のハッド兼ヒートシンクとなる Ti/Au 厚膜金属 (約 $10 \mu\text{m}$) を再度スハッタ及びメッキにより形成する^{[36]・[42]・[44]}。

2.3 一次元 (発振方向) 構造解析

2.3.1 解析手法及び構造パラメータ

本節では VCSEL の発振方向についての解析を行う。基本的な量としてまず発振閾値と外部微分効率があり、これらの値から電力-光出力変換効率が求められる。素子寸法が $10 \mu\text{m}$ 以上であれば媒質内波長に比べて充分大きく、本一次元解析で十分な精度が得られる。

VCSEL は DBR によって共振器を構成しているため、この DBR での多重反射をまずは取り扱う必要がある。この方法について二通り説明する。

a) フレネルの式から漸化式を導く方法

これはフレネルの法則を用いた最も基本的な取り扱いである。図 2.5 に示す半導体多層膜での境界を考える。この面での複素反射率、複素透過率はフレネルの公式 (2.1) で与えられる。これから DBR を構成する各多層膜での漸化式を導き、これを解くことにより、全体のハワー反射率、ハワー透過率を求める。これらより閾値利得や外部微分効率が後述の様に求められる。

$$\begin{aligned} r_{12} &= \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \\ t_{12} &= \frac{2n_2}{n_1 + n_2} \end{aligned} \quad (2.1)$$

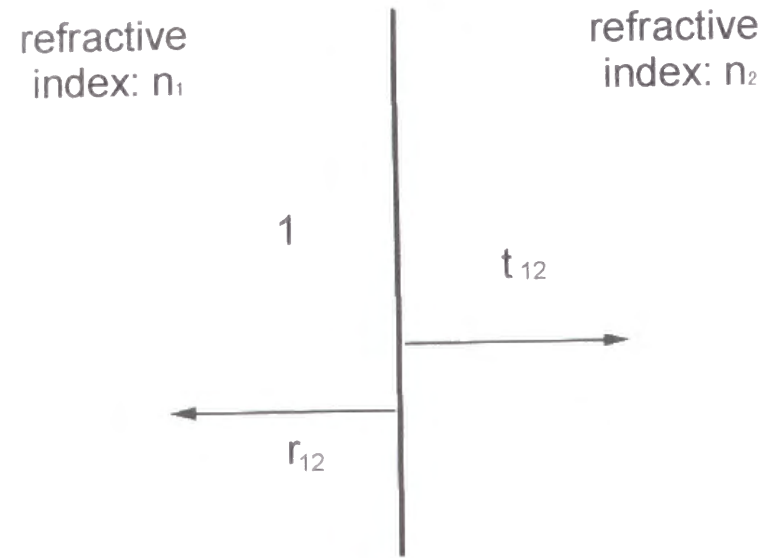


図 2.5 漸化式を導く方法の説明図

b) 特性行列法

この特性行列法は、a) の漸化式を求める方法をより一般化したものである。各多層膜の光学特性を一つの行列で表し、単にこれらを順に掛け合わせることで全体の光学特性を求める事が出来る

媒質 $i-1$ と媒質 i との電界の関係は行列を用いて表すと、

$$\begin{bmatrix} E_{i-1}^{+R} \\ E_{i-1}^{+R} \end{bmatrix} = B_{i-1}^{-1} B_i M_i \begin{bmatrix} E_i^{+R} \\ E_i^{+R} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

となる。ここで、電界 E の添え字 \pm は進行方向を、 L , R は境界の左右を表し、

$$B_i = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ n_i & -n_i \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$M_i = \begin{bmatrix} \exp(j2\pi n_i / \lambda) & 0 \\ 0 & \exp(-j2\pi n_i / \lambda) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

である。行列 B は端面での反射を表し、やはりスネルの式 (2.1) から得られる。また、 M は各媒質での位相ずれを表し、吸収のある場合には n が複素数となる

したがって、全体の入射光と出射光の関係は

$$\begin{bmatrix} E_0^{+R} \\ E_0^{+R} \end{bmatrix} = S \cdot \begin{bmatrix} E_{N+1}^{+L} \\ E_{N+1}^{+L} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = B_0^{-1} U_1 \cdots U_N B_{N+1} \quad (2.6)$$

の様に求められる。ここで、 U を各層の特性行列と呼び、以下で定義される

$$U_i = B_i M_i B_i^{-1} \quad (2.7)$$

これらより、全体のパワー反射率 R 、パワー透過率 T は以下のようにになる

$$R = \frac{|E_0^{+R}|^2}{|E_0^{+R}|^2} = \frac{|S_{21}|^2}{|S_{11}|^2} \quad (2.8)$$

$$T = \frac{n_{L+1}}{n_0} \frac{|E_{N+1}^{+L}|^2}{|E_0^{+R}|^2} = \frac{n_{L+1}}{n_0} \frac{1}{|S_{11}|^2} \quad (2.9)$$

本解析では、上記2種類の方法で解析し、いずれも同一の解の得られる事を確認している。図 2.6 に本解析に用いた構造モデルを示す。計算に用いた各媒質の屈折率には、ドーピングによるプラズマ効果を考慮してあり、経験則により求められた式を用いた。図 2.7 にその分散関係を示す。また各媒質の吸収にはドーピングによる自由キャリア吸収効果を考慮し、ドーピング濃度から次式 (2.10) を用いて各層の吸収係数 α_{fc} を見積もった³⁸⁾。

$$\alpha_{fc} (cm^{-1}) = 7 \times 10^{-18} p (cm^{-3}) + 3 \times 10^{-18} n (cm^{-3}) \quad (2.10)$$

ここで p 、 n はそれぞれ p 型、n 型のドーピング濃度を示す。本式は室温中の GaAs における基礎吸収端付近の自由キャリア吸収のドーピング濃度依存性を示す経験式である。価電子帯間の間接遷移に起因し、p 型で n 型より 2 倍強の効果があるのは、関与する価電子帯の有効質量の差によるものとされている³⁹。

中間層のドーピング濃度は、分布を平均化して活性層より上を $p = 0.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、下を $n = 1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ として計算したが厳密に実際の濃度プロファイルを入れて計算したものと結果は殆ど変わらない。

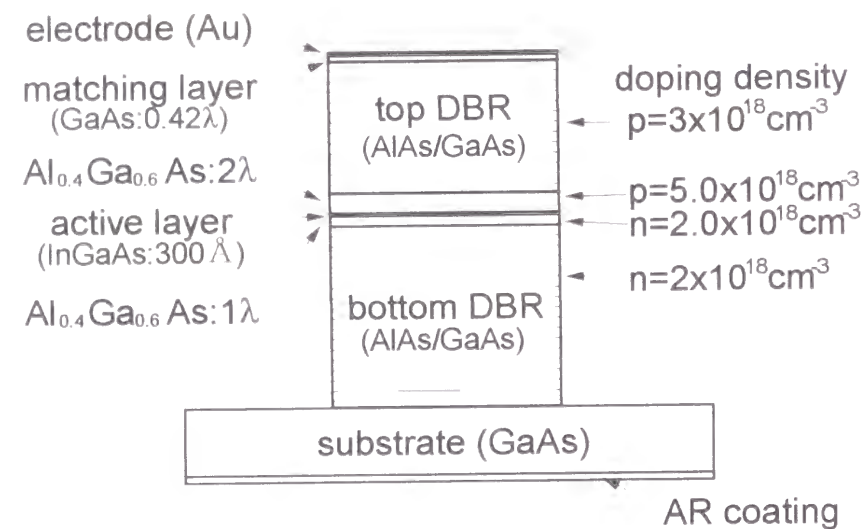


図 2.6 本解析に用いた構造モデル

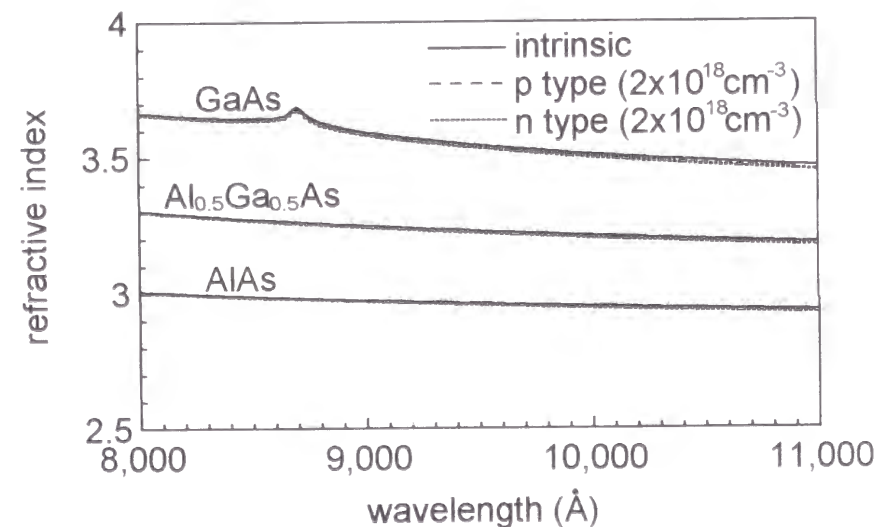


図 2.7 ドーピングによるプラズマ効果を考慮した分散関係

2.3.2 発振閾値

先に述べたように、上部 DBR の最上層には電極を兼ねた厚膜金蒸着膜が形成されており、これによって上部 DBR の反射率は増強される。但し、導体特有の表皮効果のために、半導体との界面において反射波に位相のずれが生じる。そこでこの位相ずれを補償するためにその下に GaAs から成る位相補償層が入れられている。

図 2.8 は、上部 DBR 層数を 29 層とし、位相補償層の厚さを 0 から媒質内波長 λ まで変化させたときの反射率を計算したものである。0.42 λ 、0.91 λ の時に最大の 99.7% が得られることがわかる。本 VCSEL では 0.42 λ を選んである。

図 2.9 はこのような上部 DBR の反射率（金電極及び位相補償層を含む）と、下部 DBR の反射率（基板を含む）の層数依存性を示したものである（図 2.2 で説明したように、各 DBR はいずれも AlAs で始まり AlAs で終わる奇数の構成であり、以後横軸を DBR 層数とする図は特に断らない限り奇数点のみ意味を持つ）。上部 DBR は 29 層で 99.7%、下部 DBR は 49 層で 99.9% に達し、反射率がほぼ飽和することがわかる。上部 DBR の方が下部より飽和値が低いのは、上部 DBR が p 型でドーピング濃度も高いため、自由キャリア吸収が下部 DBR より 3.5 倍大きいことに起因している（式 (2.10) 参照）。

以上求めた反射率を用いて発振閾利得 g_{th} が次の式の様に得られる。

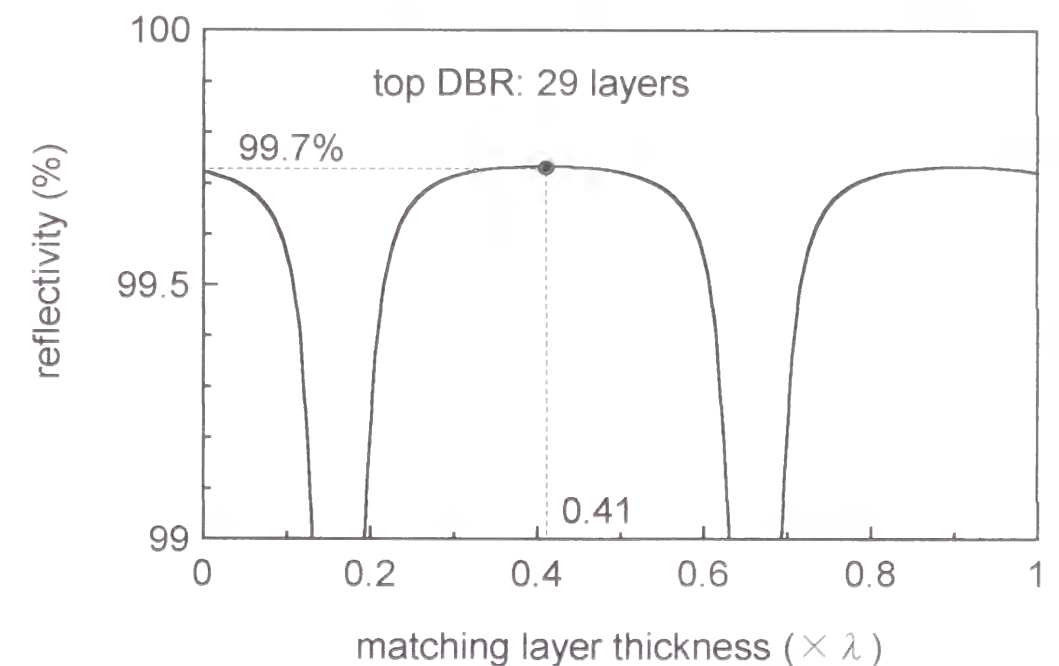


図 2.8 上部 DBR の反射率の Au 位相補償層厚依存性

$$g_{th} = \alpha_i + \frac{\ln\left(\frac{1}{R_t \cdot R_b}\right)}{2L} \quad (2.11)$$

ここで R_t 、 R_b はそれぞれ上部及び下部 DBR の反射率を、 α_i は内部損失、 L は共振器長を示している

図 2.10 は、上部 DBR 数を 29 層と固定し、下部 DBR 層数を 0 から 79 層まで変化した時の発振閾値利得の変化を計算したもので、下部 DBR 部のドーピング濃度を 0 から $2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ まで変化した場合について示してある。反射率が 49 層程度で飽和することに対応して閾値利得も飽和する

図 2.11 は上部 DBR 数を 29 層、下部 DBR 数を 49 層としたときの発振閾値における素子内部の光強度分布を示したものである。中間層を中心として光が閉じ込められており、活性層が定在波の腹に位置していることがわかる。活性層を腹の位置にのみ置くことによって、共振器方向の光閉じ込め率は、活性層厚が共振器内の定在波一周期分の膜厚より十分厚い場合に比べて 2 倍、増強されることがわかる。

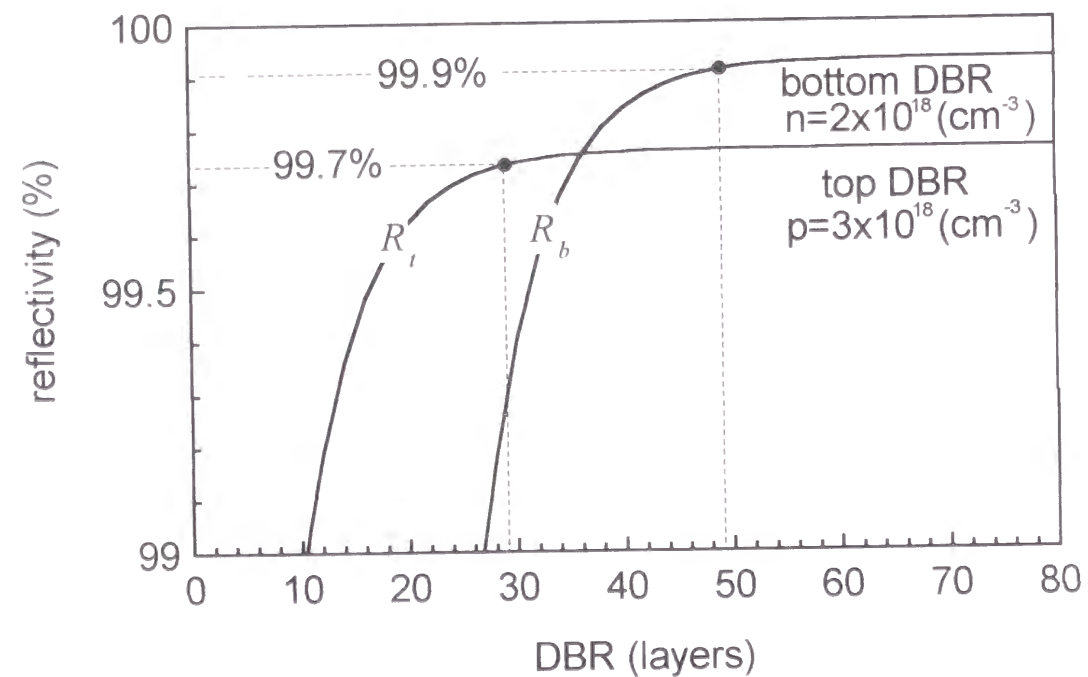


図 2.9 反射率の DBR 層数依存性

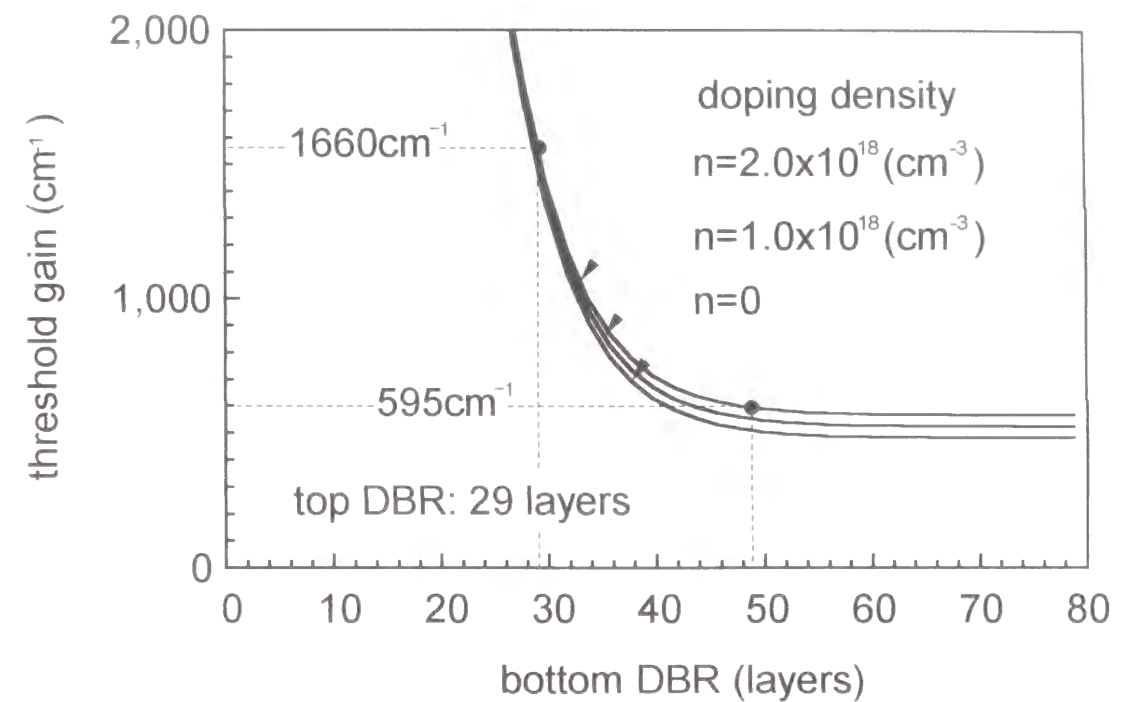


図 2.10 発振閾値利得の下部 DBR 層数依存性

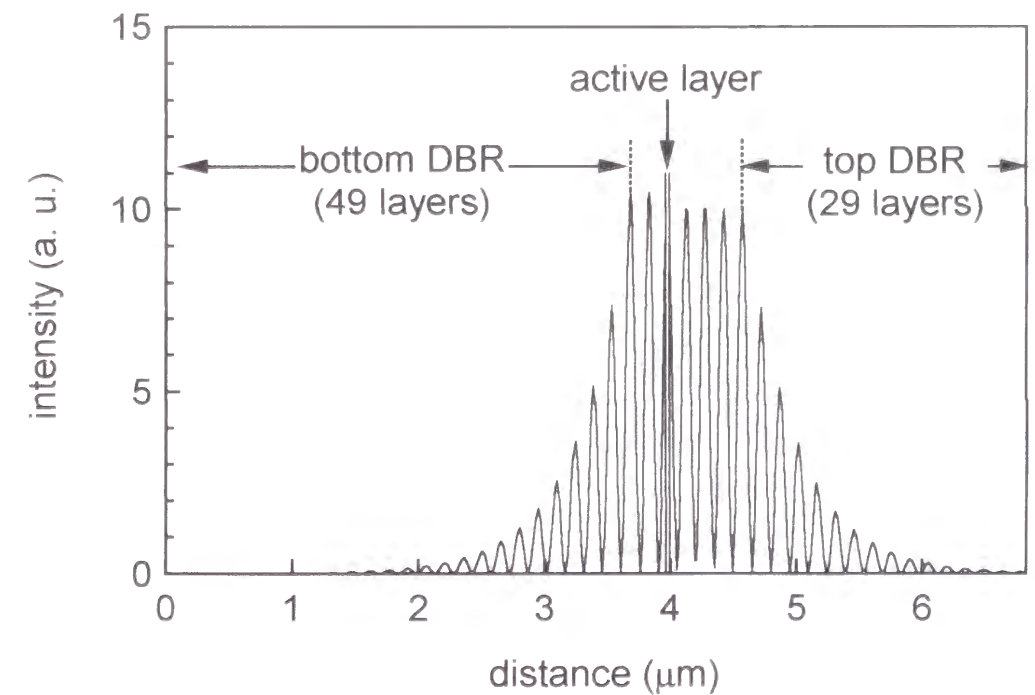


図 2.11 発振閾値における素子内部の光強度分布

2.3.3 外部微分量子効率

外部微分量子効率 η_d は近似的に以下の式で求められる

$$\eta_d = \eta_i \cdot \frac{\ln(R_t \cdot R_b)}{\ln(R_t \cdot R_b) - \alpha_i L} \cdot \frac{(1 - R_b)\sqrt{R_t}}{(1 - R_b)\sqrt{R_t} + (1 - R_t)\sqrt{R_b}} \cdot \frac{T_b}{T_b + A_b} \quad (2.12)$$

η_i : 内部量子効率

α_i : 内部損失

L : 実効共振器長

R_t : 上部 DBR のパワー反射率

R_b : 下部 DBR のパワー反射率

T_b : 下部 DBR のパワー透過率

A_b : 下部 DBR のパワー吸収率

ここで反射鏡損失 α_m に関する以下の式を用いた

$$\alpha_m = -\frac{\text{Re}\{\ln(R_t \cdot R_b)\}}{L} \quad (2.13)$$

また、式 (2.12) の第三項は光出力の前後比

$$\frac{1 - R_b}{1 - R_t} \cdot \frac{\sqrt{1 - R_t}}{\sqrt{1 - R_b}} \quad (2.14)$$

による補正を示している。また第四項は下部 DBR の吸収を考慮した補正である。光出力の注入電流に対する効率を表すスロープ効率 (W/A) を求めるには式 (2.12) にさらに $h \omega q$ をかける必要がある。

式 (2.14) の前後比は以下の 6 つの連立方程式を解く事により求められる (図 2.12)

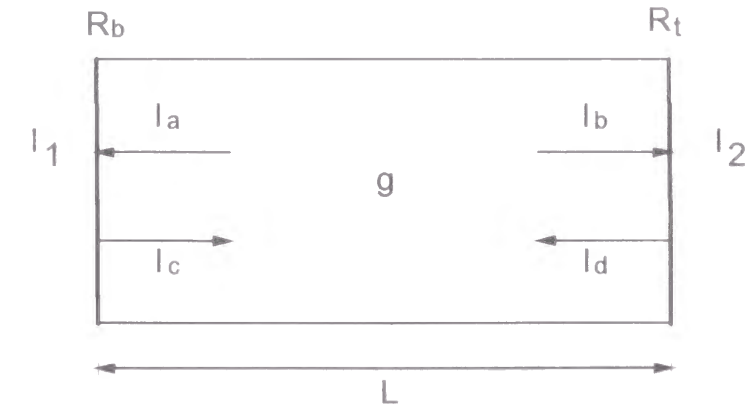


図 2.12 前後比を説明するための図

$$\begin{aligned} I_1 &= (1 - R_b)I_a \\ I_c &= R_b I_a \\ I_d &= R_t I_b \\ I_2 &= (1 - R_t)I_b \\ I_b &= I_c e^{gL} \\ I_a &= I_d e^{gL} \end{aligned} \quad (2.15)$$

ここで、 I は光強度、 R はパワー反射率、 g は利得、 L は共振器長を表す。

以上の解析より求められた VCSEL の外部微分量子効率の下部 DBR 数依存性を図 2.13 に示す。図 2.10 及び図 2.13 からわかるように、発振閾値と外部微分量子効率は相

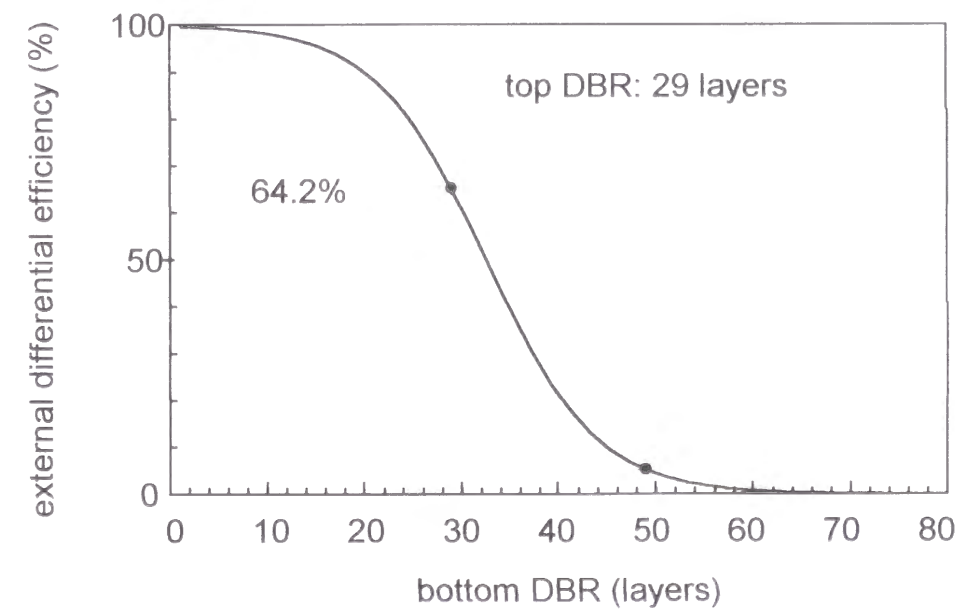


図 2.13 外部微分量子効率の下部 DBR 数依存性

反関係にある。従って、外部微分量子効率を向上させるためには或程度の発振閾値の上昇を犠牲にすることは unavoidable だが、この上昇分を得られる最低の閾値利得（約 600 cm^{-1} ）の 3 倍まで許すとすると、下部 DBR 層数は 29 層となり、このときの外部微分量子効率は 64.2% となる。

2.3.4 戻り光雑音の及ぼす影響及び考察

前述の様に本 VCSEL は裏面出射型である。これは素子上部の金電極による反射補強及び放熱を兼ねさせるためである。このため出射される光は基板裏面からの反射の影響を受けることになる。基板厚は基板裏面の研磨によって決まるため、これを波長程度で制御することは困難であるが、その結果として基板裏面からの戻り光の位相が基板内でばらつき、それが素子特性のばらつきを引き起こすことになる⁴⁰⁾。図 2.14 に内部共振モードと外部共振モードの競合の様子を概念的に示す。この基板裏面からの戻り光によって外部共振器が構成され、上下 DBR で形成される VCSEL の内部共振器と直列に結合した複合共振器ができる。下部 DBR 層数が少ないほど戻り光の影響が大きく、この複合共振器の効果を大きく受けることになる。この効果を定量的に解析するため、基板厚の位相を $-\pi$ から $+\pi$ まで変化させ、発振閾値利得と発振波長を逐次計算により求めた。

複合共振器の効果は以下の様に原理的に説明できる。角周波数 Ω を持った光波が基板厚 D_s を往復する時間は

$$t_s = 2 \frac{D_s}{c} \quad (2.16)$$

であり、元の光と戻り光との位相差は

$$\Omega t_s = 2 \frac{\Omega D_s}{c} \quad (2.17)$$

となる。この位相差が N を整数として

$$\Omega t_s = 2N\pi \quad (2.18)$$

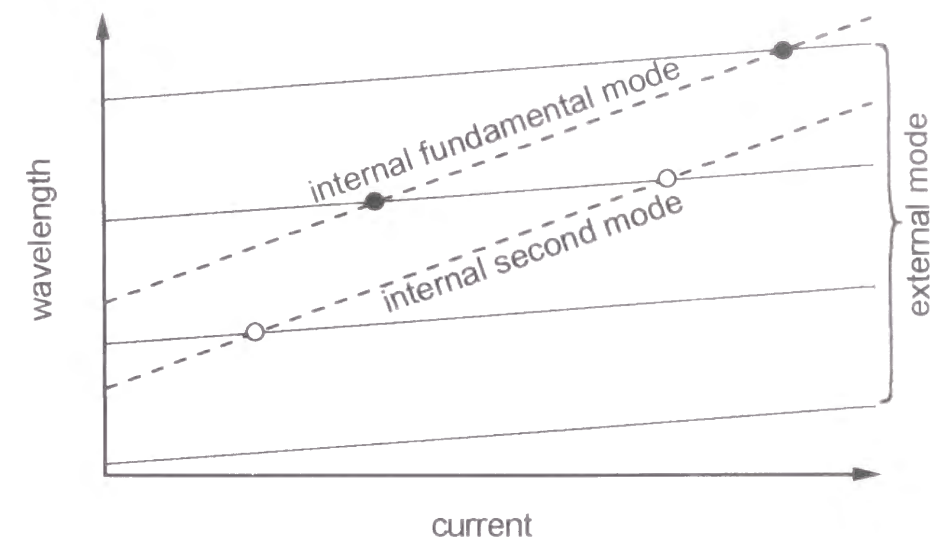


図 2.14 内部共振モードと外部共振モードの競合を説明するための図

の場合には内部共振器モードと外部共振器モードの位相が一致（constructive interference）し、複合共振器内に効果的に定在波が立つので、VCSEL の反射率が実効的に高められる。従って、閾値電流は最低となる。これに対して、

$$\Omega t_s = (2N-1)\pi \quad (2.19)$$

となる場合には、両モードは完全に逆位相となり、互いに打ち消し合う（destructive interference）。従って、VCSEL の反射率が実効的に低められ、閾値電流は最高となる。

以下の図 2.15 から図 2.17 は、上部 DBR を 29 層と固定し、下部 DBR の層数を変化させたときの閾値利得、スロープ効率及び発振波長のばらつきをそれぞれ示している。設計共振波長は 9500 Å としてあり、図中実線で示した odd 及び even は上述の constructive interference 及び destructive interference の場合をそれぞれ示している。斜線で囲まれた範囲内でこれらの特性がばらつくことがわかる。また、破線は基板裏面への無反射処理を施した後の各特性値を計算したもので、これにより各種特性ばらつきが完全に抑えられることがわかる。

以下、個々の特性についての計算結果と、実際の測定結果との比較しながら説明する。測定では素子寸法を横モード効果の少ない 20 μm 角とし、下部 DBR 層数として 29, 37, 49 層の 3 種類を用意した。また、黒丸が無反射処理前の測定結果、白丸が無反射処理後の測定結果を示している。

イ) 発振閾値 (図 2.15)

下部 DBR 数を 59 層から減少させていくと、外部共振モードの効果で 49 層付近から急激にばらつきが増大する。37 層まで増大した後、これを境に今度は減少し始める。これは内部共振モードに対して外部共振モードが優勢となり、この波長に引き込まれるからである。実測した無反射処理前の閾値電流 (黒丸) のばらつきは、計算によって求めた閾値利得のばらつきとほぼ一致している。但し、量子井戸活性層における閾値電流と閾値利得は一般的に次式のようにオフセットを持つ対数関数で結ばれており、

$$g_{th} = g_0 \cdot \left\{ \ln \left(\frac{J_{th}}{J_0} \right) + 1 \right\} \quad (2.20)$$

図 2 のような閾値電流と閾値利得の線形表示では厳密に一致しない。49 層での実験値と計算値のずれはこれが原因と推測される。無反射処理後の実測値 (白丸) は確かに特性ばらつきが抑えられる傾向にあることを示している。

ロ) スロープ効率 (図 2.16)

同様にしてスロープ効率を計算すると、こちらは下部 DBR 数が 59 層付近でもかなりばらつくことがわかる。37 層でやはりばらつきが最大となり、19 層以下ではほぼ完全に集束する。無反射処理前の実測値 (黒丸) は、49 層での数点を除いて計算結果と良く一致している。この計算には内部量子効率 0.33 を用いており、このように内部量子効率が小さい理由としてメサ側壁での非発光再結合によるキャリアの消費が考えられる。ここでもやはり無反射処理により、特性ばらつきが抑えられる (白丸)。

ハ) 発振波長 (図 2.17)

図 2.17 は発振波長の設計共振波長 λ_0 からのずれを表したものである。実際の素子では同一基板内でも場所によって共振波長が多少異なるため、図中黒丸で示した測定点は無反射処理後の発振波長 λ_o を設計共振波長と仮定し、次式のような波長ずれ $\Delta\lambda$ を図示したものである。

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 \quad (2.21)$$

ここで、 λ_0 は無反射処理後の発振波長を表している。

測定値は計算値よりも大きくばらついているが、これは発振閾値がばらついているにもかかわらず閾値電流付近での波長を測定したため、素子温度にばらつきが生じ、これが波長ばらつきを引き起こしたものと考えられる。従って、むしろイ) の発振閾値のばらつきに比例した結果となっている。

以上示した戻り光による複合共振器の効果は、静的特性ばらつきの原因となるばかりでなく、動的変動、つまり戻り光誘起雑音の原因ともなる。

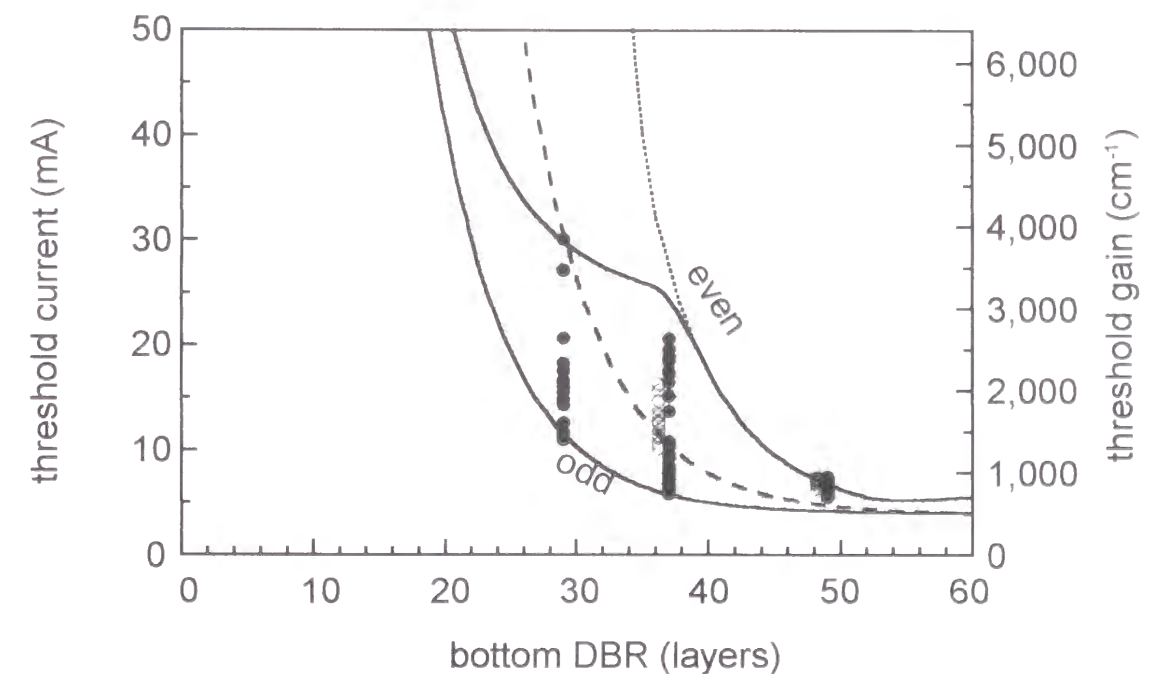


図 2.15 発振閾値 (閾値利得) の下部 DBR 数依存性 ●は無反射処理前、○は処理後の閾値電流 (左軸) の実験値。実線、波線はそれぞれ無反射処理前、処理後の閾値利得 (右軸) の計算曲線。点線は内部共振器モードのみの場合。

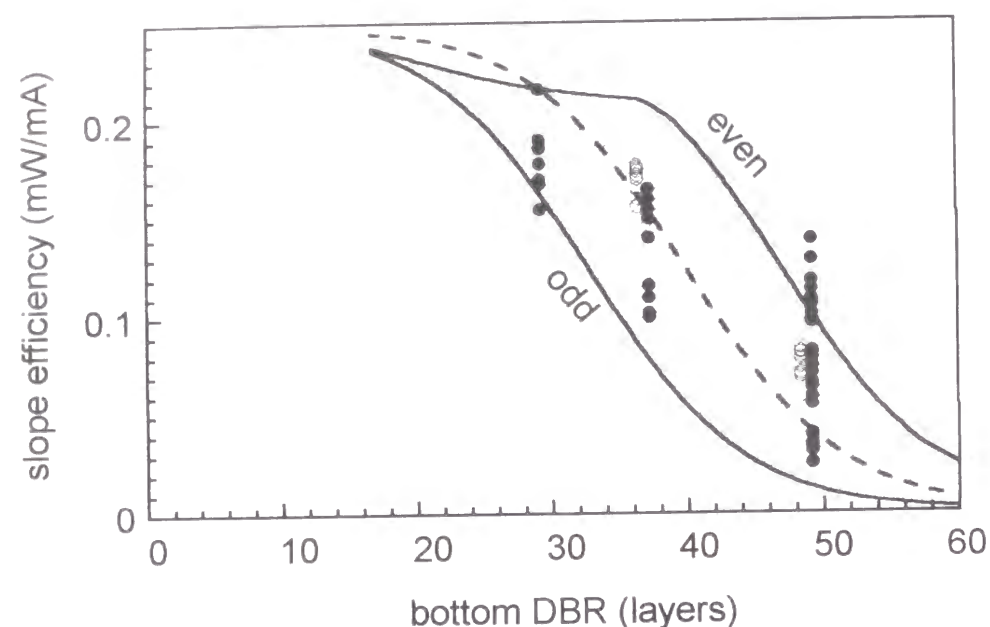


図 2.16 スロープ効率の下部 DBR 数依存性。●は無反射処理前、○は処理後の実験値。実線、波線は計算曲線

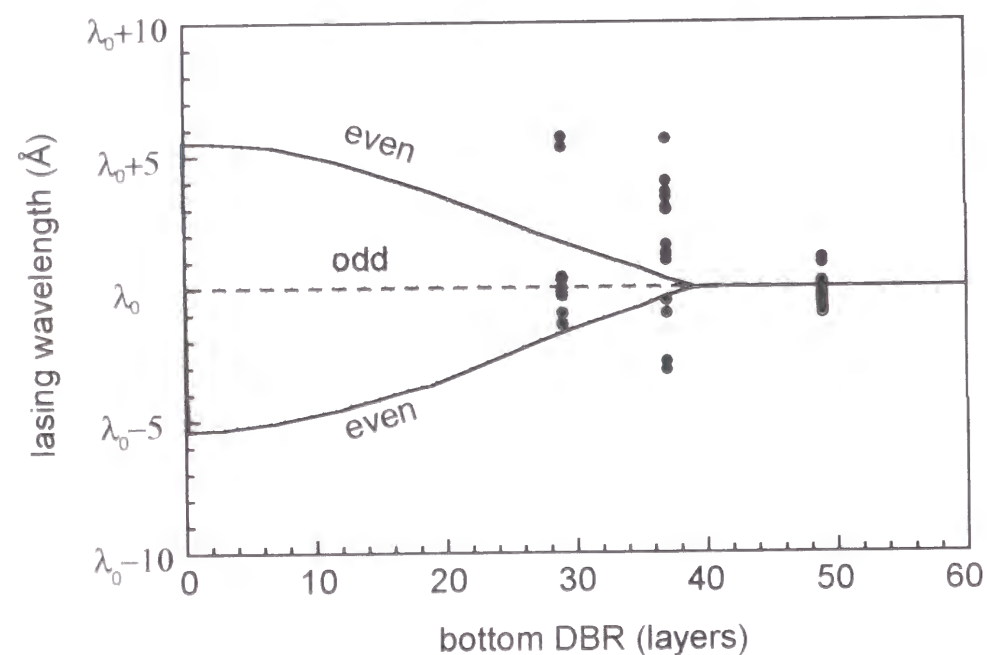


図 2.17 発振波長の下部 DBR 数依存性。●は無反射処理前の発振波長を処理後の発振波長から差し引いた実験値。実線、波線は計算曲線

2.4 二次元（円筒座標）構造解析

次により具体的なメサ光閉じ込め構造について、光強度分布の縦モード、横モードを包括的に解析し最適化する 3 次元有限要素法解析について述べる。まずは VCSEL を回転体と近似し、円筒座標を用いて擬似的に 2 次元として解析する方法を用いる。この様な解析により素子寸法を小さくしたときのメサ部による回折損失の効果を、原理的に取り込むことが可能となる。

2.4.1 構造モデル及び構造パラメータ

本解析に用いた構造モデルを図 2.18 に、また構造パラメータを図 2.19 に示す。上部 DBR 数を 29 層、下部 DBR 数を 29 層とし、中間層の組成は簡単のため $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ としてある。活性層の屈折率としてここでは GaAs の値を用いた。層厚が 300 Å と薄いためこの影響は小さいものと考えられる。設計発振波長は 9800 Å とした。金電極の屈折率は 0.166、吸収係数は 128228 cm^{-1} とした^[41]。メサ上部にのみ位相補正層として 0.42 λ 厚の GaAs 層を挿入している。素子下部は空気層で、ここは 3 λ (2.94 μm) 厚とした。利得は活性層中のメサ下部領域にのみに与え、 1000 cm^{-1} とした。その他の部分は、利得、吸収ともに 0 とした。

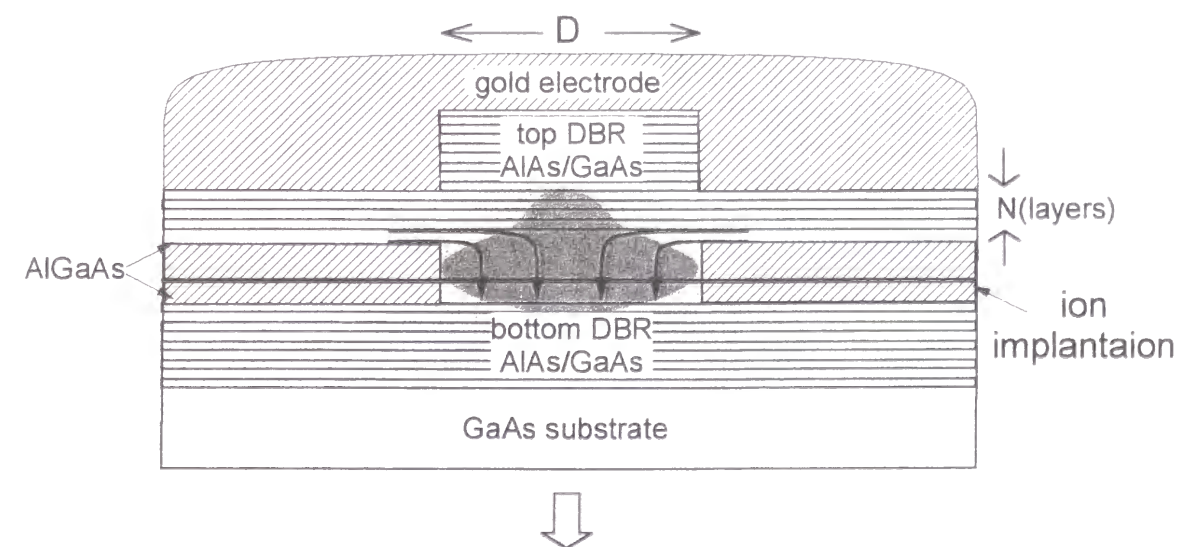


図 2.18 本解析に用いた構造モデル

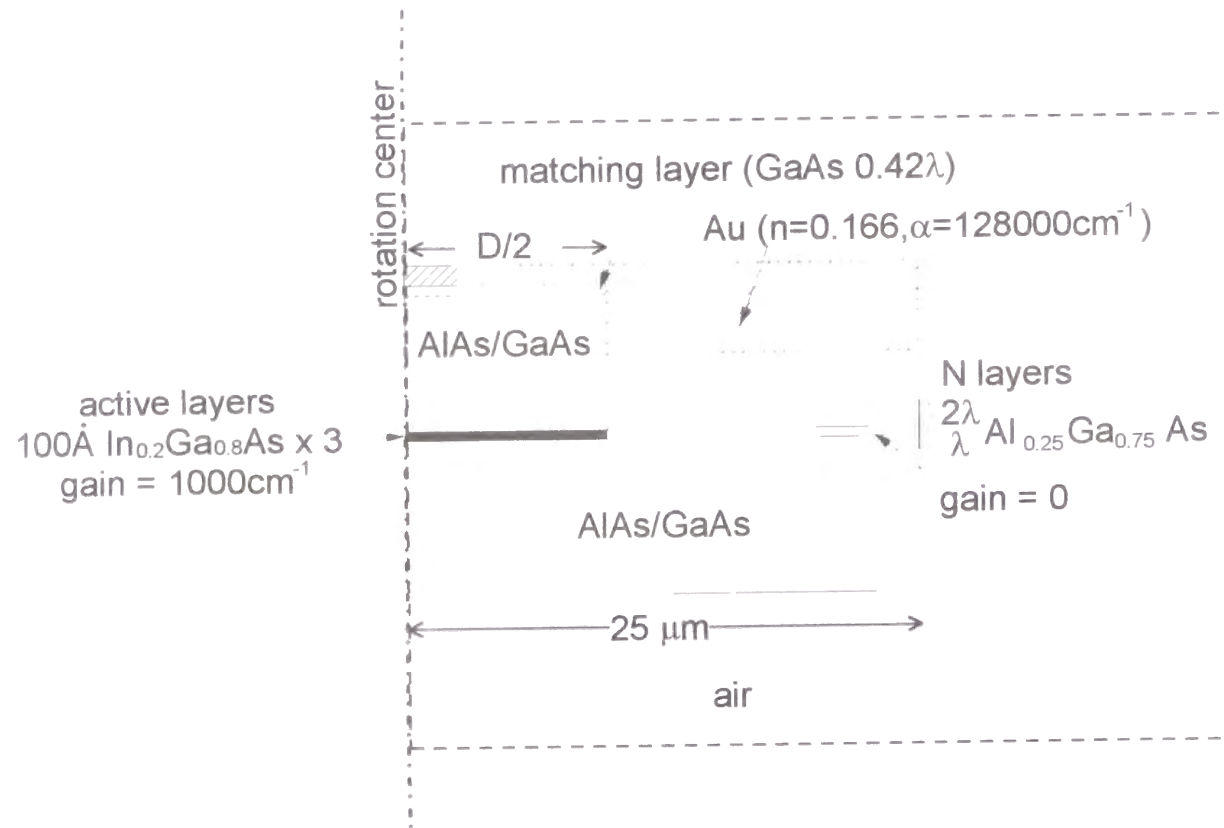


図 2.19 解析に用いた具体的構造パラメータ

立体形状は図 2.19中の破線を回転軸とする回転体で、メサの直径 D を 0 から $10\ \mu\text{m}$ まで変化させた。上部 DBR 数のうちメサ状に切り落とした部分の DBR 数を差し引いたものを残留 DBR 数と呼び、これを最適化パラメータ N として様々に変えて解析を行った。この残留 DBR 数は AlAs で始まり GaAs で終わる偶数とする必要がある。AlAs で終わると酸化により表面が荒れ、電極とのオーミック接触が取れないためである。基板の寸法は横方向に直径 $50\ \mu\text{m}$ と十分大きく取っている。

2.4.2 解析手法

解析方法は、Maxwell 方程式をスカラー化し、複素有限要素法で解く方法である。まず、以下の Maxwell 方程式を考える

$$\begin{aligned} \text{rot}E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \text{rot}H &= \frac{\partial D}{\partial t} \\ \text{div}B &= 0 \\ \text{div}D &= 0 \end{aligned} \quad (2.22)$$

1 番目あるいは 2 番目の式に rot を施すことにより、次の簡略化した Maxwell 方程式を得る

$$\text{rot}(\text{rot}A) = \omega^2 \mu\epsilon A \quad (2.23)$$

これを円筒座標系で表現し、

$$\begin{aligned} \text{div}A &= 0 \\ A &\propto e^{i\varphi} \end{aligned} \quad (2.24)$$

とすると、

$$\left(-\Delta + \frac{\nu^2}{r^2} - \omega^2 \mu\epsilon\right)\Psi = 0 \quad (2.25)$$

の形のスカラー方程式で表すことができる。

本解析では、伝播定数 k (振動数 ω) を未知数とし、包絡関数ではなく電界振幅そのものを微分を無視せずに解いている。ベクトル方程式である Maxwell 方程式をスカラー化しているため、電界の媒質境界に垂直な成分の接続条件に誤差を生じる可能性がある。特にメサ寸法が小さく、電界の基板側に大きく染みだした構造では、この誤差が大きく効く可能性がある。境界条件としては closed boundary 法を用いた。この方法では、計算領域の周辺で急激に電界振幅が 0 となるため、計算領域の大きさか素子中の定在波分布にまで影響を与える可能性がある。そのため、本解析では素子外部の空気層の吸収係数を $10000\ \text{cm}^{-1}$ と十分大きく設定し、電界振幅が滑らかに減衰して周辺部の値 0 に接続するよう工夫した。実際には無限遠までかけて光振幅が減衰するので、この方法では素子外での光強度分布は正しく記述できないが、素子内のそれにはほとんど影響しない。

2.4.3 解析結果及び考察

図 2.20 に様々な素子寸法における、横方向光閉じ込め係数と残留 DBR 数との関係を示す（図 2.19 で説明したようにここでは偶数のみ意味を持つ）。また、図 2.21 に残留 DBR 数 N を固定したときの閉じ込めとメサ直径の関係を示す。これらの図から明らかなように、残留 DBR 数が少ないほど小さな素子でも光閉じ込めが強いことがわかる。これは残留 DBR 数が少ないほどメサ部の段差が大きくなり、実効的に活性層部とその周辺との屈折率差が大きくなるためである。このメサ光閉じ込めの効果を以

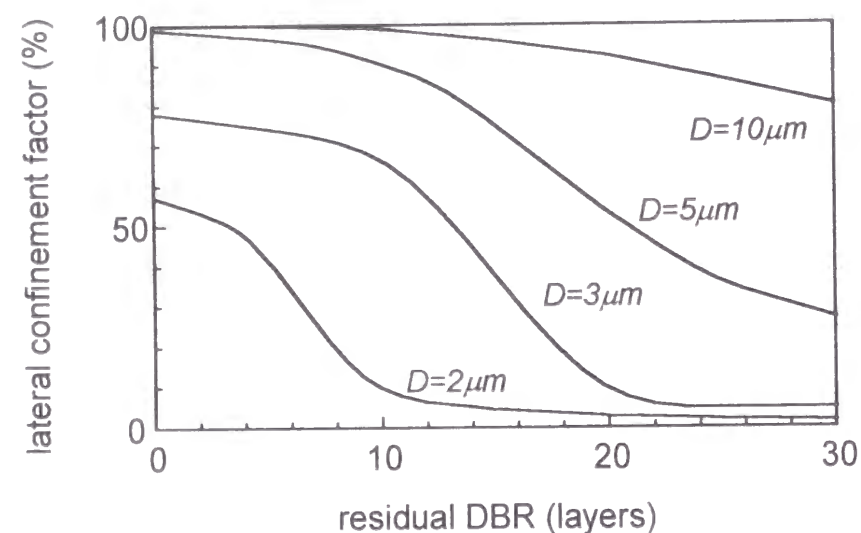


図 2.20 残留 DBR 層数と横方向光閉じ込め率の関係

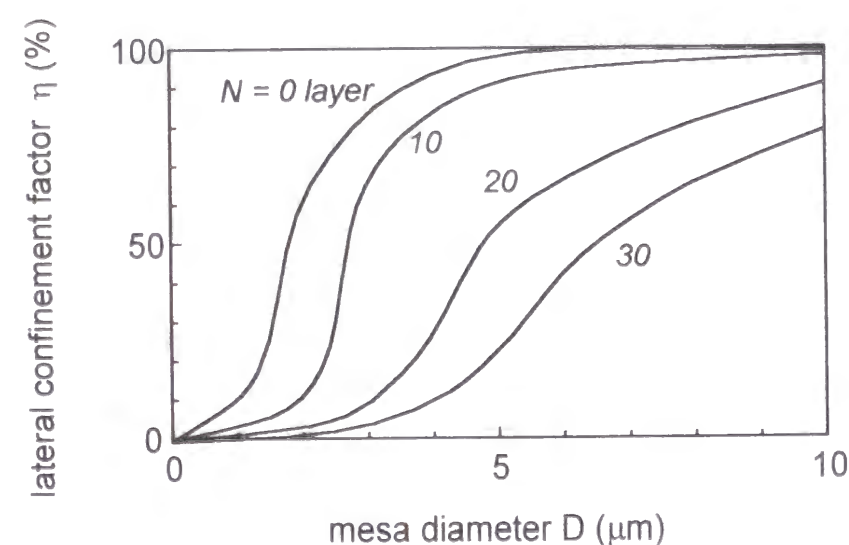


図 2.21 素子寸法と横方向光閉じ込め率の関係

下、より具体的に見ていくことにする。

メサ寸法の大きい方から順に見ていくと、10 μm 以上では残留 DBR 数が 1 層から 29 層の全領域で光閉じ込め率 80% 以上を確保できることがわかる。この解析ではメサ外部を空気としているが、特にメサエッチングせずとも活性領域の上部にのみ位相補正層を挿入して全体に金蒸着するだけで、80% の光閉じ込め率が得られる。この時の素子中の光強度分布を図 2.22 (a) に示した。比較のために素子上部に金も位相

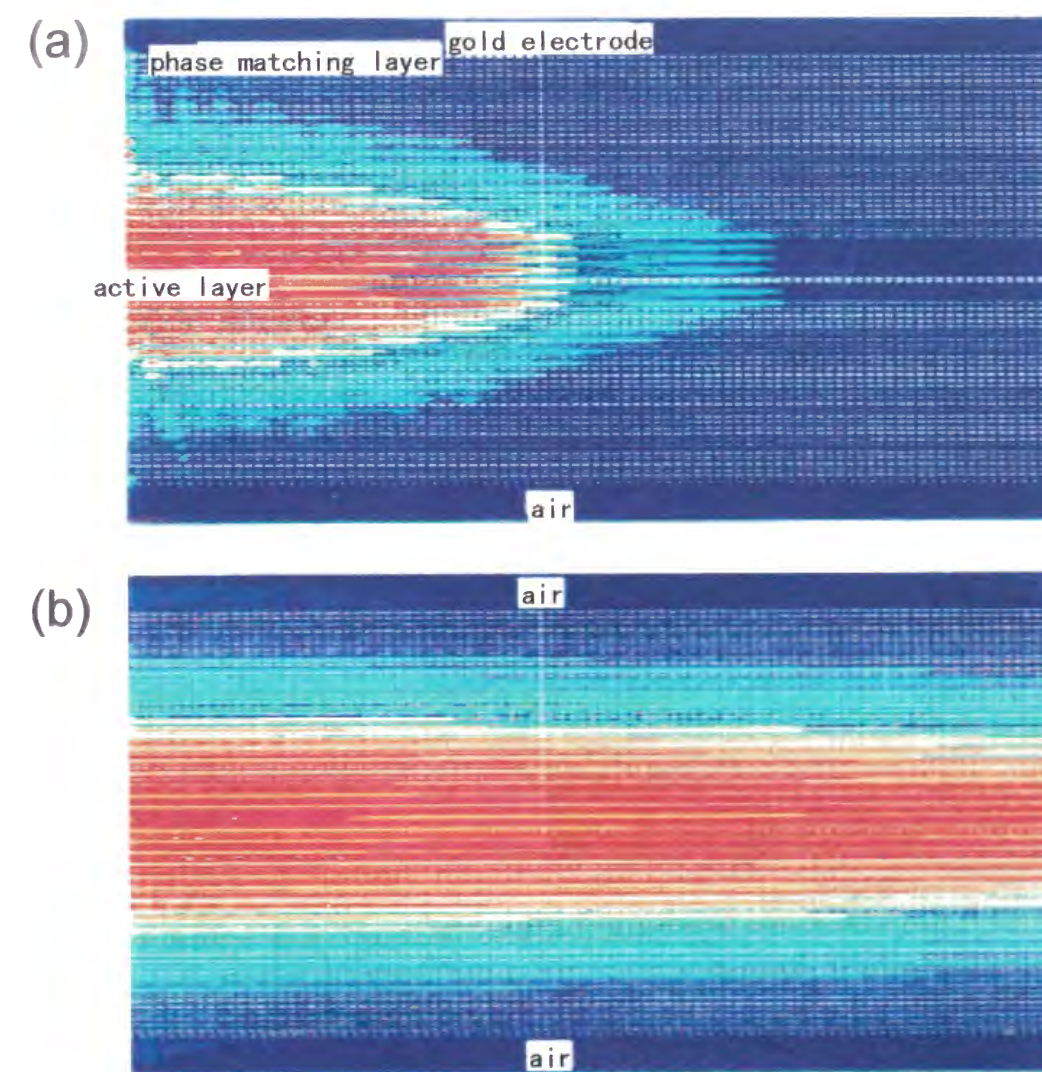


図 2.22 金電極及び位相補正層の有無による光強度分布の変化。

(a) 金及び位相補正層がある場合。

(b) 金及び位相補正層がない場合。

いずれもメサ径は 10 μm でメサエッチングはしていない。

補正層も形成しない場合の光強度分布を図 2.22 (b) に示したが、これでは光を全く閉じ込めることができないことがわかる。このことより、利得導波の効果だけでは光を全く閉じ込められないことも同時にわかる。

メサ寸法 $5\text{ }\mu\text{m}$ では、残留 DBR 数 13 層以下で 80%以上の光閉じ込め率が得られる。残留 DBR 数 9 層及び 29 層での時の光強度分布を図 2.23 (a)、(b) にそれぞれ示した。9 層の (a) では電界がメサ部に強く閉じ込められているが、29 層の (b)

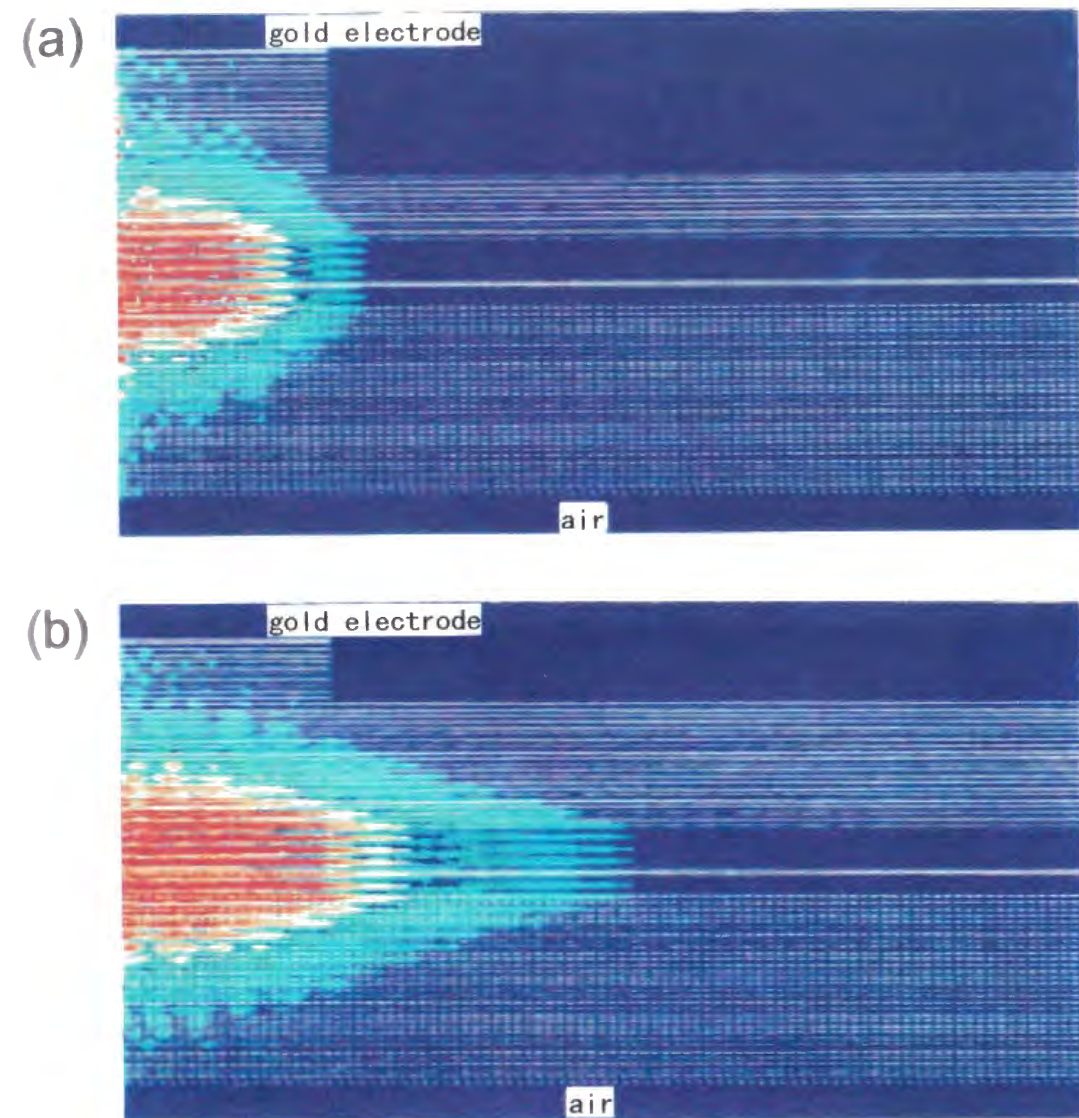


図 2.23 残留 DBR 層数による光強度分布の変化。

(a) 残留 DBR9 層、(b) 残留 DBR29 層。

いずれもメサ径は $5\text{ }\mu\text{m}$ 。

では外側に大きくしみ出している様子がわかる

さらに小さな $3\text{ }\mu\text{m}$ の素子寸法では残留 DBR 数を 0 として始めて 80%近い光閉じ込め率が得られ、 $3\text{ }\mu\text{m}$ 未満ともなると中間層部までエッチングしなくては光閉じ込め率 80%を得ることはできない ところが、実際の素子では図 2.4に示したように中間層がイオン注入によって高抵抗化してあり、電流は中間層の表層および上部残留 DBR を通して横方向から注入される 駆動電圧の上昇を抑えるにはこのシート抵抗の低減が不可欠であり、上部 DBR をできるだけ多く残す必要がある 素子寸法 $6\text{ }\mu\text{m}$ 以上では残留 DBR を 4 層以上設ければ、シート抵抗を十分小さく抑えることが別り考察からわかっている

図 2.24は、仮に残留 DBR 数を 0 として作製した VCSEL の発振閾値電流の素子寸法依存性である 一辺が $6.5\text{ }\mu\text{m}$ 以上の全素子で、発振閾値電流が素子面積にほぼ比例しており、回折損失による閾値上昇のないことがわかる この結果は本解析で得られた図 2.21の結果と一致している。

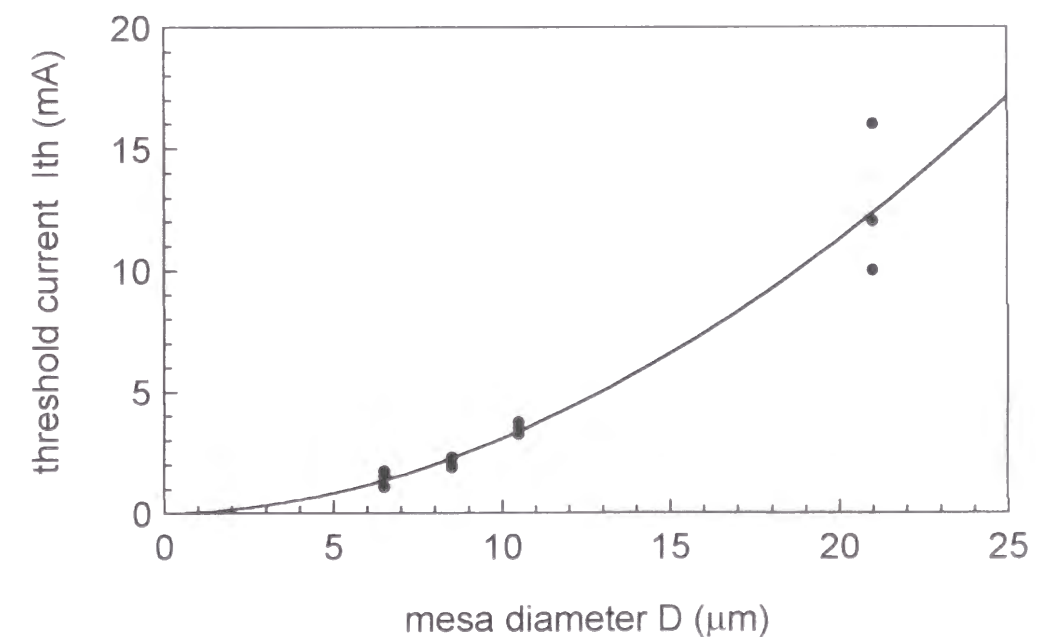


図 2.24 残留 DBR 数 0 での発振閾値電流のメサ寸法依存性

2.5 三次元（全方位）構造解析

前節では簡単のために VCSEL を回転体として円筒座標を用い、擬似的に 2 次元として近似解析を行ったが、実際の VCSEL 構造は作製上の容易性から矩形メサ形状をしている。そこで本節ではこれを近似することなく 3 次元的に解析を行う。また、前節では活性層の利得を固定し、そのときの光閉じ込めを計算したが、本節では利得そのものを変動パラメータとした。実際に発振する閾値利得を厳密に求めることができる。

2.5.1 構造モデル、構造パラメータ及び解析手法

構造モデル及びパラメータは 2.4 と同一である。近似手法としてもやはり偏光方向を水平平面内の任意の一定方向に固定するスカラー近似を用いている。しかしながら、ここで興味のある最低次モードでは偏波面が一定のため、特に問題はない。また、素子の上下端では波数ベクトルが端面に垂直としているが、電界の集中する活性層周囲の情報には影響を与えない。

境界条件としては、素子の上下端で outgoing wave、側面では振幅を 0 とする closed boundary の境界条件を用いている。

2.5.2 解析結果及び考察

残留 DBR 数を 0 から 12 まで変化させたときの横方向光閉じ込め率と素子の一边の長さとの関係を図 2.25 (a) に示す。また、これに対応した発振閾値利得と素子の一边の長さとの関係を図 2.25 (b) に示す。閉じ込め率の結果は 2.4 節の円筒近似の結果と大きな差はなく、やはり単一モード条件を満たす $6\text{ }\mu\text{m}$ 付近では残留 DBR 数 6 層が限界であることがわかる。閾値利得の解析から、素子寸法を $6\text{ }\mu\text{m}$ 、残留 DBR 数を 6 層としたときでも回折損失の影響により閾値が約 2 倍上昇してしまうことがわかる。このため実際の素子では、残留 DBR を通過して注入される電流の抵抗増加を避けるために、残留 DBR 数を 4 層として作製してある。また、素子寸法 $4\text{ }\mu\text{m}$ 付近で 6 層と 12 層の関係が逆転するが、これは 6 層の時にもっとも素子側面の金メッキ部への光のしみ出しが大きく、金による吸収の影響を受けることが原因である。

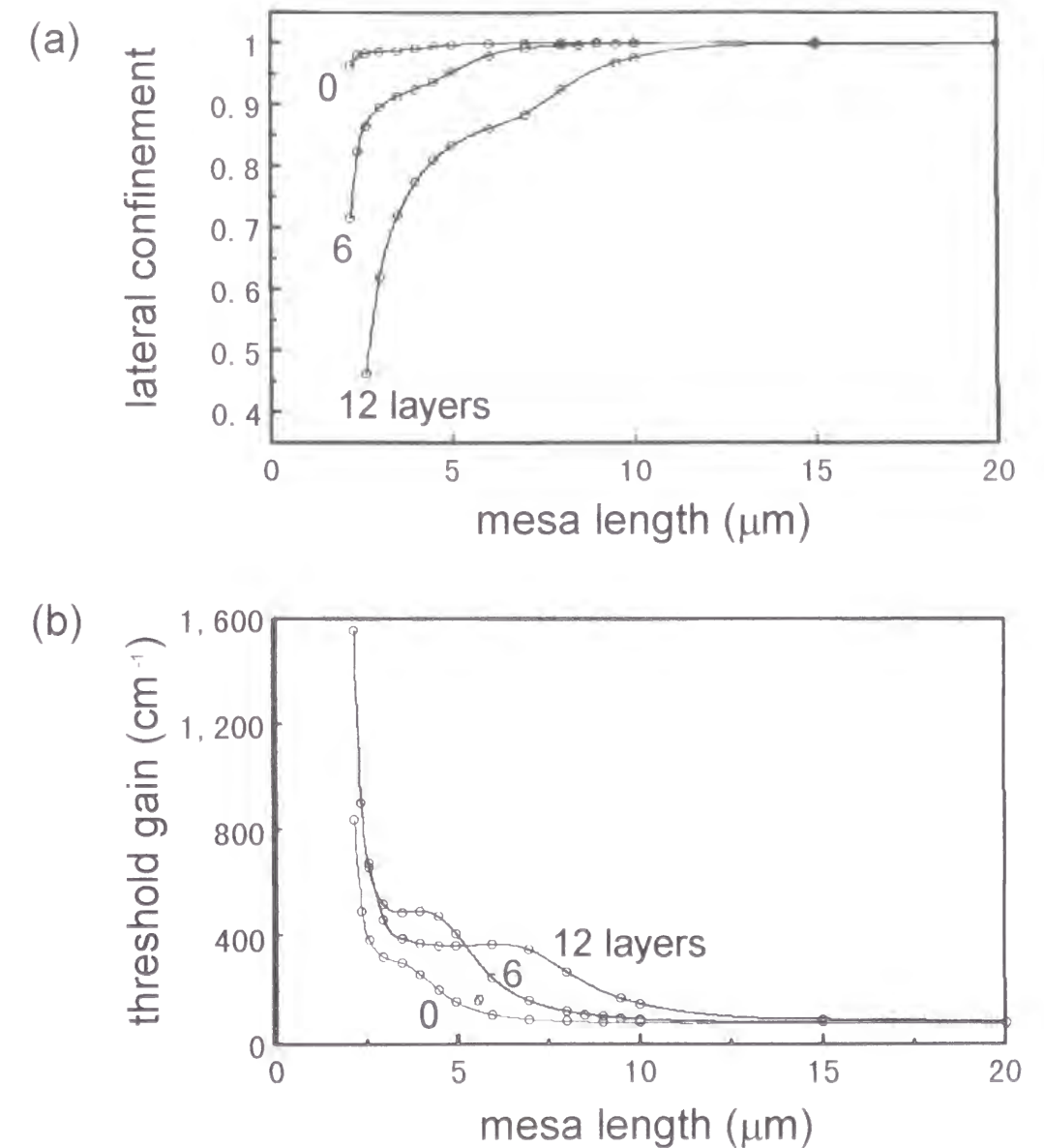


図 2.25 a) 横方向光閉じ込め率及び (b) 発振閾値利得のメサ寸法依存性

図 2.26 に素子寸法、発振波長、閾値電流の関係を一つの図で示した。この図より、単一モード条件を満たす $6\text{ }\mu\text{m}$ 以下の領域では残留 DBR を増やすに従い急激に閾値電流が増加する様子がわかる

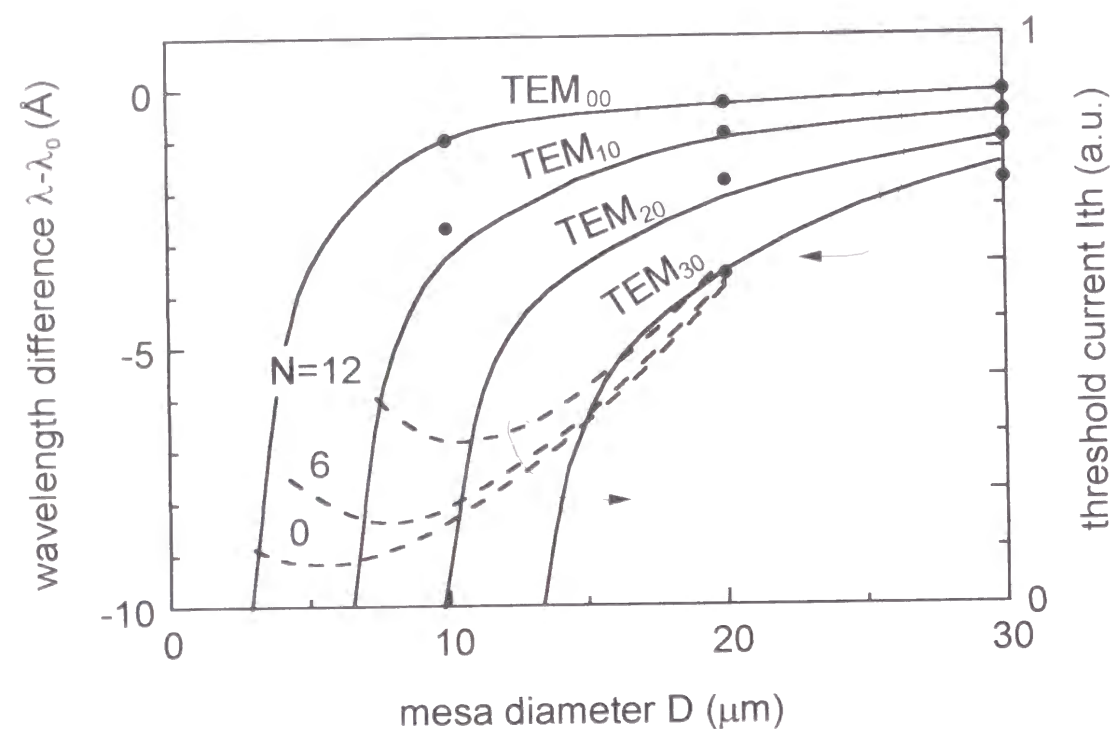


図 2.26 発振波長（実線）及び発振閾値電流（破線）のメサ寸法依存性
●は発振波長の実測値。

2.6 素子特性

本節では本 VCSEL の光出力－電流特性、電流－電圧特性、発振スペクトル、温度特性等の基本特性と実際の光データ伝送応用時に重要となる変調特性を示す

2.6.1 基本諸特性

a) I－L、I－V、電力－光出力変換効率

図 2.27 にメサ寸法 $6\text{ }\mu\text{m}$ の素子の室温、cw 駆動時の電流－光出力特性を示す。発振閾電流は 1 mA 、外部微分量子効率は 40% となっている。図中の破線はその I－V 特性で、発振閾値における駆動電圧は 2.1 V 、 1 mW 光出力時の電圧は 2.8 V と低く、DBR を疑似組成傾斜構造とした効果が現れている。また、図 2.28 にこの素子の電力－光出力変換効率特性を示す。図中の破線はその電力－電流特性を示す。電流 3.9 mA の時に電力 11 mW となり、最大の電力－光出力変換効率約 11% を得ている⁴² ⁴⁶。また、発振閾値電流に関して 7% 、スロープ効率に関して 5% の特性均一性を得ている⁴³。

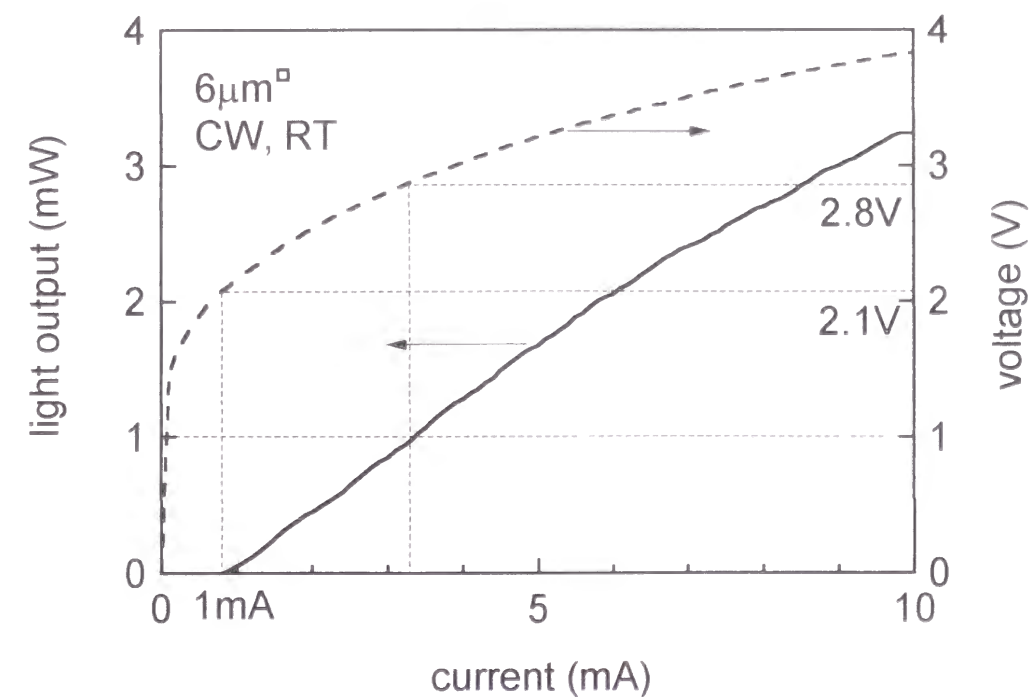


図 2.27 光出力－電流特性および電圧－電流特性

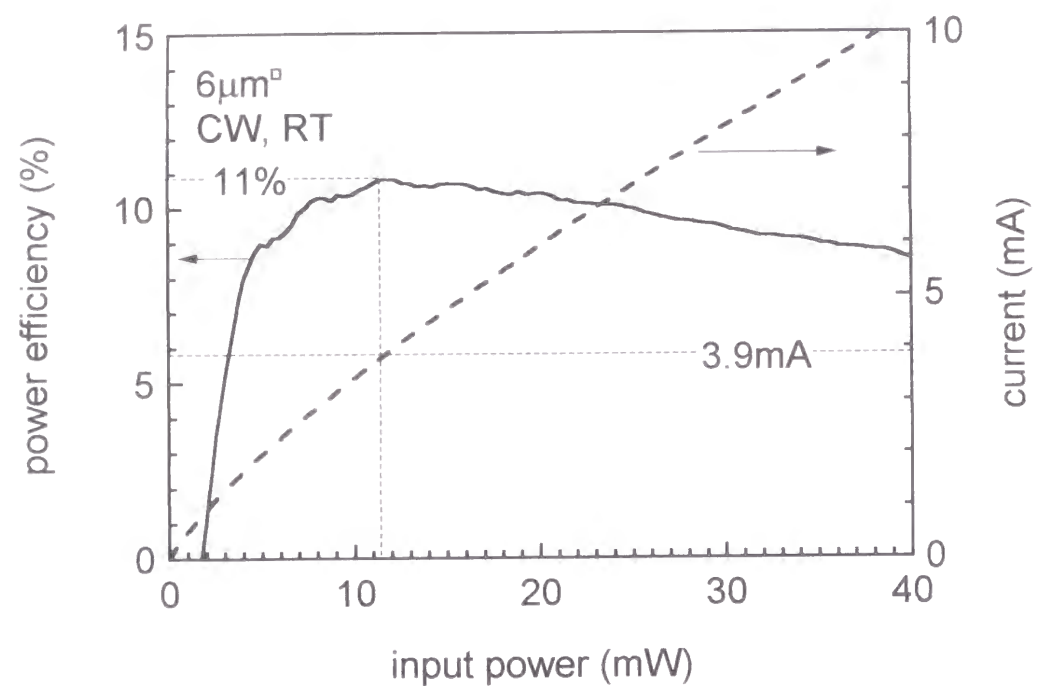


図 2.28 電力－光出力変換効率特性および電流－電力特性

b) 発振波長のメサ寸法依存性

図 2.29 に発振スペクトルの素子寸法依存性を示す。測定は、発振閾値の 1.5 倍のハルス電流注入で行った。線幅は分光器の分解能で決まっている。各素子の発振線が複数個あるのは高次横モードが現れているためで、長波長側から短波長側に向けて基本横モードから高次横モードに向かい、これに伴って順に腹の数が増加していることを波長分解近視野像の測定により確認した。各素子間の波長ずれは主に層厚不均一性に由来するものである。図 2.30 のように各横モードのピーク波長 (λ_{oi}) の基本モード発振波長 (λ_{00}) からのずれを図示すると、先に 2.5 節の図 2.26 に示した波長差と良く一致することがわかる。

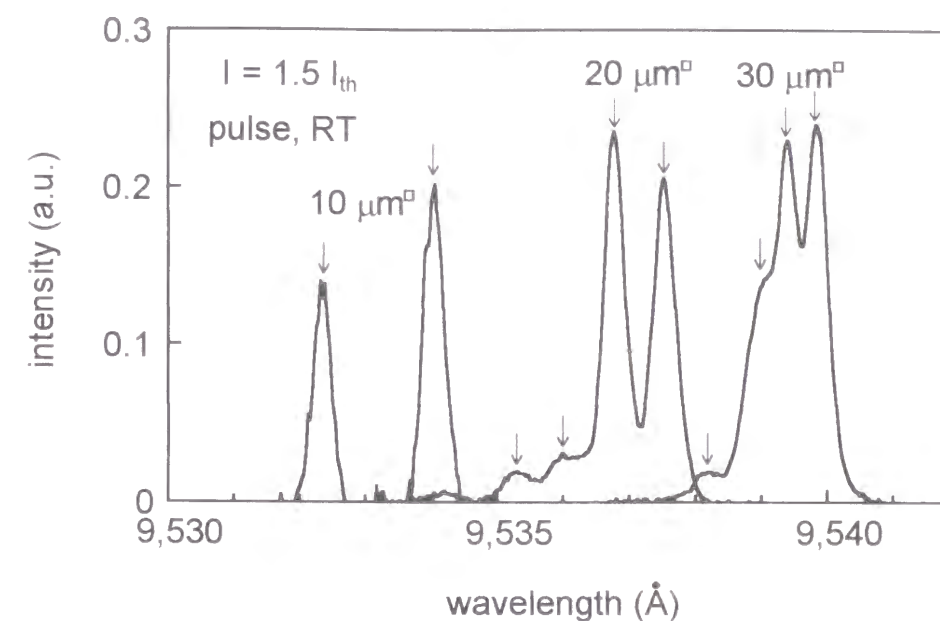


図 2.29 発振スペクトルの素子寸法依存性

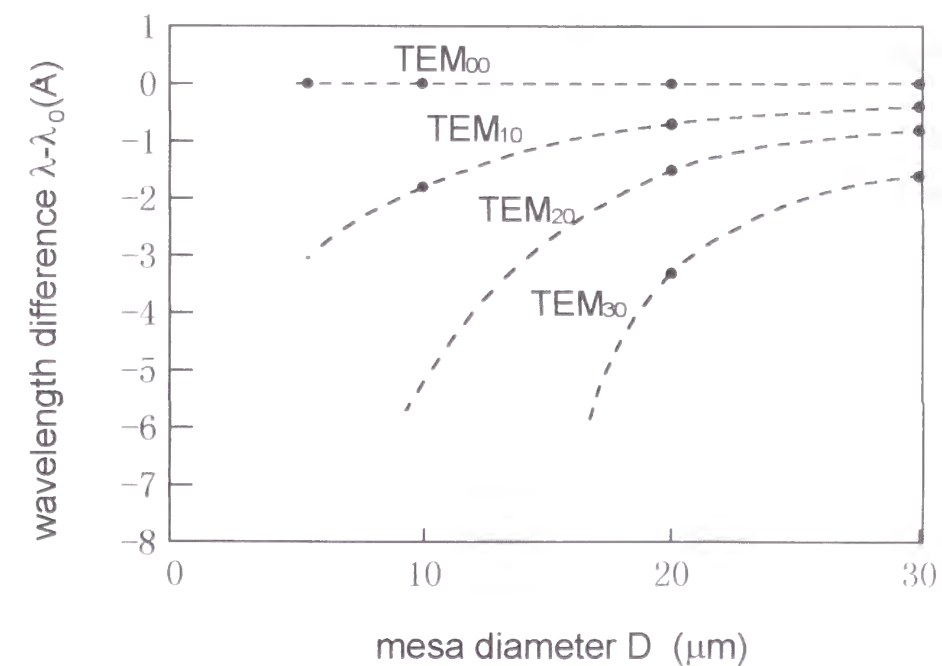


図 2.30 基本モード波長を基準とした各横モードの波長

c) レーザ光放射形状（近視野分布及び遠視野分布）

図 2.31 下側に放射光強度の角度依存性（遠視野分布）の注入電流依存性を示す。

(a) の素子寸法 $10\ \mu\text{m}$ 角では閾値電流付近（約 $2\ \text{mA}$ ）では単峰性の強度分布を示し、単一モードで発振していることがわかる。電流を増やしていくと徐々に多峰性の分布となり、高次モードが次第に優性となる様子がわかる。これに対し (b) の $20\ \mu\text{m}$ 角では閾値電流付近（約 $10\ \text{mA}$ ）においても既に単峰性からのずれが見られ、多くのモードが混在している様子がわかる。各図の上側に計算機解析によって得られた遠視野分布を示す。 TEM_{00} から TEM_{04} までの各モードを適当な重みを付けて重ねあわせることにより、実験により得られた強度分布をかなりの精度で再現できることがわかる。

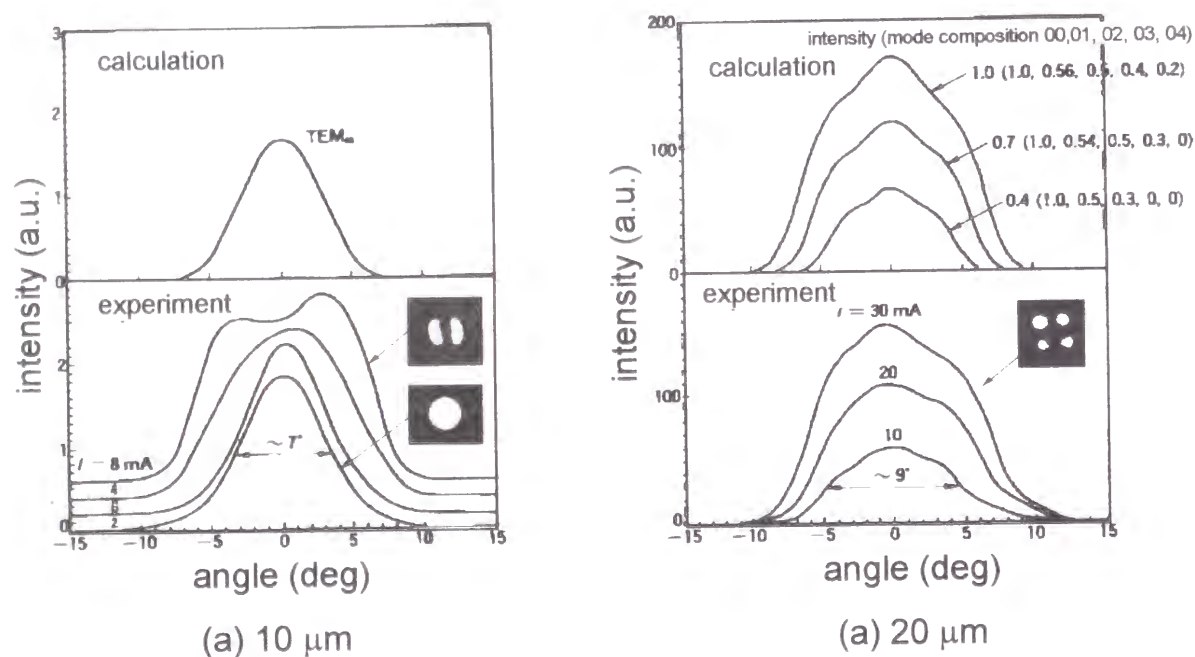


図 2.31 下側：遠視野強度分布の注入電流依存性と対応する近視野像

上側：遠視野強度分布の計算機解析結果

(a) $10\ \mu\text{m}$ 角、(b) $20\ \mu\text{m}$ 角

$6\ \mu\text{m}$ 角にまで素子寸法を小さくすると、電流を上げててもこれらのような多峰性を示すことのない完全な単一モードでの発振が得られる。また図 2.32 には TEM_{00} から TEM_{20} までの各モードについて、遠視野半値全幅の素子寸法依存性を計算機解析により求めている^[47]。これらの結果は図 2.32 の実験結果と良く一致している。メサ形状が正方形の場合には TEM_{0x} モードと TEM_{x0} は対等であり、つまり偏光はある方向には定まらない。ところが、メサ形状をわずかに矩形状に歪ませることにより、良好な偏光制御を行うことができる^[48]。

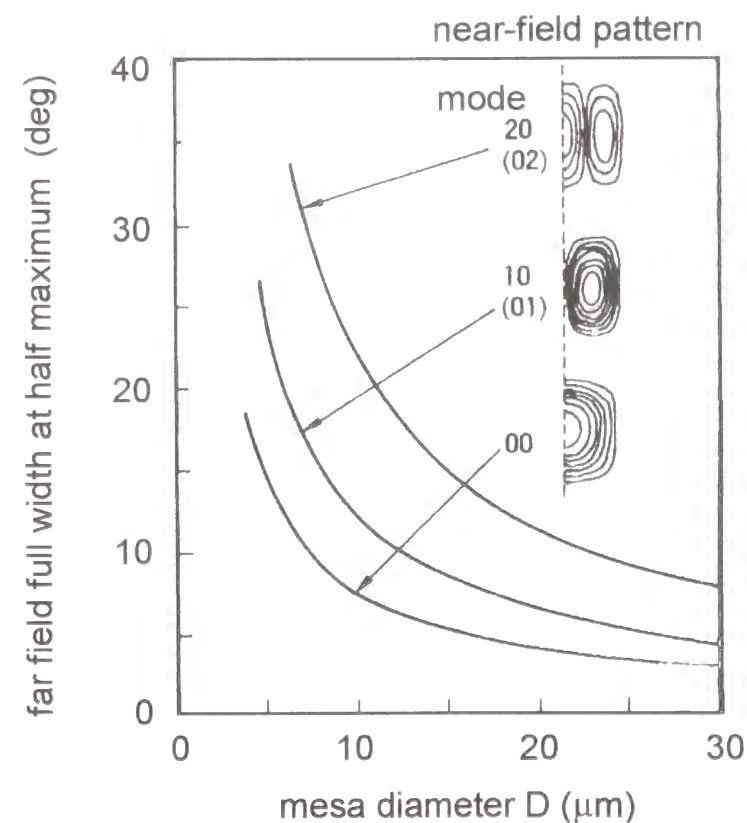


図 2.32 計算機解析により得られた各種放射モードの遠視野半値全幅の素子寸法依存性と対応する近視野像

2.6.2 高周波変調特性

前節では VCSEL 素子単体での基本諸特性を示した。本節では、2次元集積化した面発光レーザを高密度に集積実装し、しかもそれぞれ独立に高周波変調駆動するための素子ならびに実装上の工夫と、その高周波変調特性について述べる。実用上はパッケージングされた状態で高ビットレート伝送時にも広範囲な環境温度下で符号誤りのない動作が必要となるため、素子そのものの高速化のみならず、電極パッドや配線に起因する寄生容量などを低減や、配線のストリップライン化によるインピーダンス整合の配慮も重要となる^{[49] - [53]}。

a) 構成

図 2.33 に作製した VCSEL アレイの高周波実装モジュールの断面構造を示す。VCSEL アレイのメサ上の半田バンプとサブキャリアをフリップチップボンディングにより自導位置合わせ (セルフアライン) 接続してある。さらにサブキャリアからの

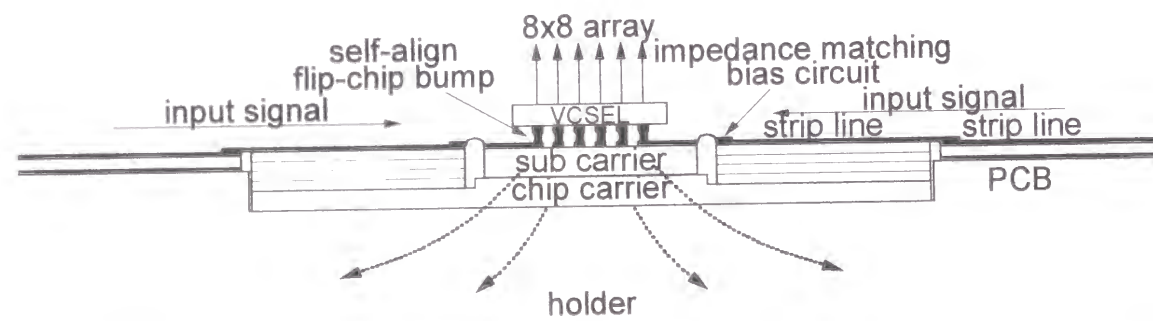


図 2.33 VCSEL アレイの高周波実装モジュールの断面構造

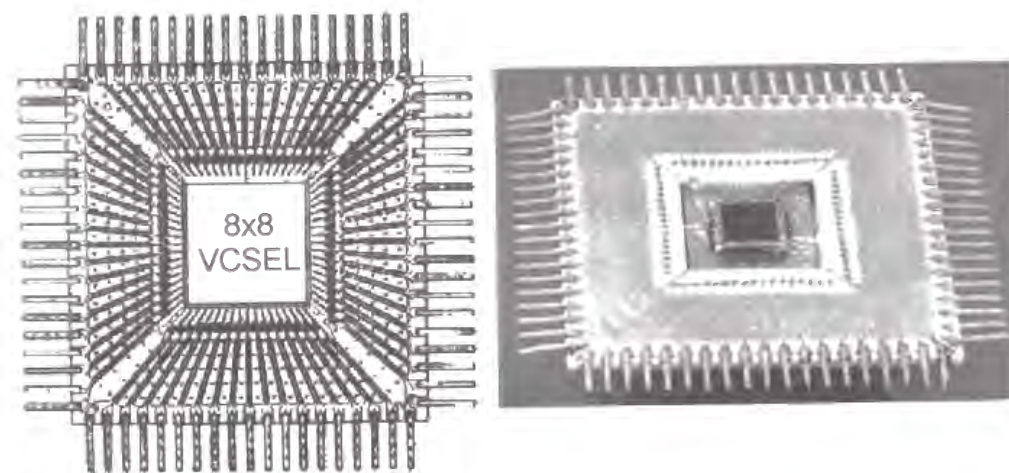


図 2.34 VCSEL アレイ個別駆動用高周波パッケージと実装写真

信号線をストリップラインの形成されたチップキャリアおよび回路基板に接続したチップキャリアの材料には放熱性の良い AlN を使用している。ストリップラインは、ピーダンス整合及びバイアス電流（直流電流）印加用の RC 回路を内蔵した多層グリーンシートセラミック構造となっている。チップキャリア及び回路基板は 10 GHz まで、信号減衰 3 dB 以下、漏話（クロストーク）が -20 dB 以下となるよう設計し、64 ch の個別駆動動作を確認した。図 2.34 に集積 VCSEL 搭載用に独自に設計した高周波パッケージの全体図とこれに VCSEL を実装した状態の写真を示す。

b) 発振遅延時間

変調特性を議論する前に、この特性を左右する重要な要素となる発振遅延時間について述べる。

発振遅延時間とは、活性層でのキャリア密度が発振閾値密度 J_{th} に達するまでの時間で定義される。まず、注入キャリアと光子密度の時間変化を表す以下のレート方程式を考える。

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \frac{J}{qd} - G(n)n_{ph} - \frac{n}{\tau_n} \\ \frac{dn_{ph}}{dt} &= G(n)n_{ph} + \beta_{sp} \frac{n}{\tau_n} - \frac{n_{ph}}{\tau_{ph}} \end{aligned} \quad (2.26)$$

ここで、 n はキャリア密度、 J は注入キャリア密度、 q は素電荷、 d は活性層厚、 n_{ph} は光子密度、 τ_n はキャリア寿命、 τ_{ph} は光子寿命、 $G(n)$ は誘導放出レート、 β は自然放出レートを示す。

発振閾値に達するまでの n_{ph} を 0 とし、最初の式を初期条件

$$n = n_b = \frac{\tau_n J_b}{qd} \quad (2.27)$$

を用いて

$$n = n_{th} = \frac{\tau_n J_{th}}{qd} \quad (2.28)$$

となるまでの時間 $t = t_d$ を求めれば発振遅延時間 t_d は以下の様に求められる

$$t_d = \tau_n \cdot \ln \left(\frac{J - J_b}{J - J_{th}} \right) = \tau_n \cdot \ln \left(\frac{I - I_b}{I - I_{th}} \right) = \tau_n \cdot \ln \left(\frac{I_p}{I_p + I_b - I_{th}} \right) \quad (2.29)$$

ここで τ_n はキャリア寿命、 I_b はバイアス電流（直流電流）、 I_p は信号電流振幅（パルス電流： $I - I_b$ ）、 I_{th} は発振閾電流を示す。バイアス電流が発振閾電流に近いほど、またパルス電流が大きいほど、さらに τ_n が小さいほど発振遅延時間を短くすることができ、変調特性を向上することができる。 $I_b = I_{th}$ のときの遅延はゼロである。式 (2.29) の括弧内を相対電流密度と呼ぶ。

図 2.35 に室温（23°C）及び 70°C における発振遅延時間の相対電流密度依存性を示す。図中の実線及び破線は式 (2.29) を用いて実験値をフィッティングしたもので、

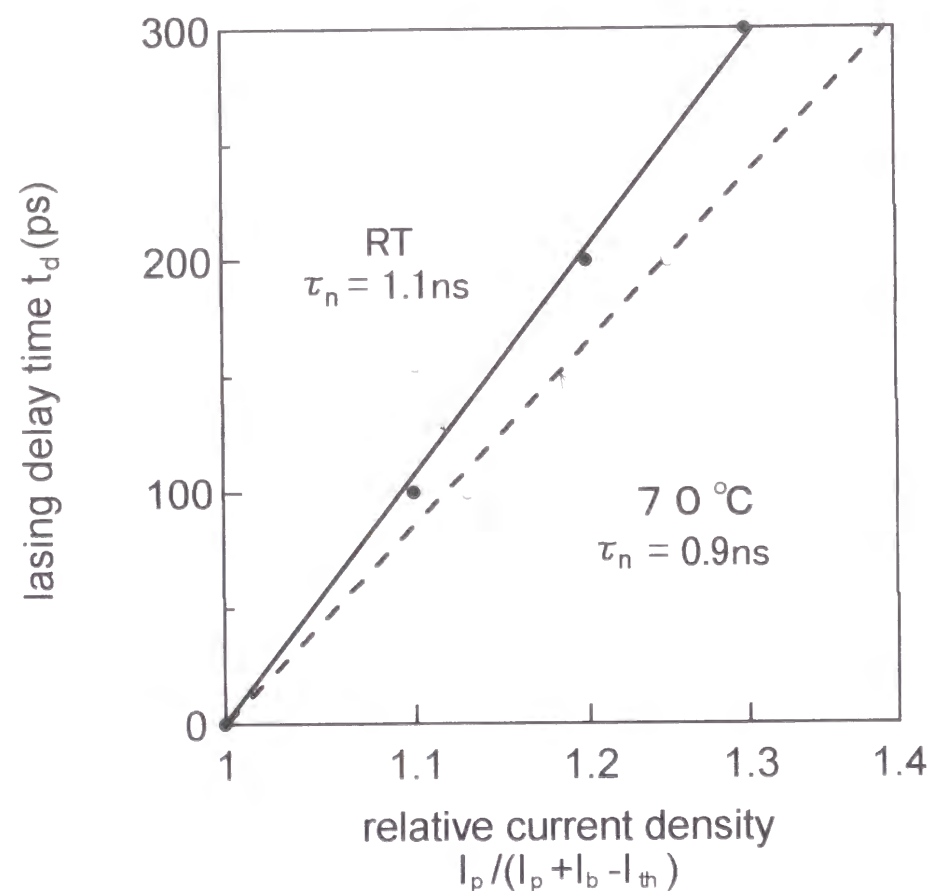


図 2.35 室温及び 70°C での発振遅延時間の相対電流密度依存性

フィッティングパラメータとなるキャリア寿命はそれぞれ 1.1 ns（23°C）、0.91 ns（70°C）となった。発振閾電流 I_{th} が 2 mA 以下の VCSEL では、バイアス電流 I_b を 1 mA、信号電流振幅 I_p を 6 mA 固定とした場合、相対電流密度は 1.2 となり、室温以上で発振遅延時間を 200 ps 以下に抑えられることがわかる。

c) 変調特性

パルス変調時の光出力信号波形はレート方程式 (2.26) を解くことにより定量的に得られる。これを見るために光入力信号を擬似乱数ビット列とし、光出力信号をクロック毎に重ねあわせたのが光変調波形（アイパターン）である。上述の発振遅延時間及び立ち下がり時間と同程度のパルス変調の場合、これらが変調波形に依存した波形効果（パターン効果）を引き起こし、光変調波形のクロスポイント歪みあるいは立ち上がりジッタを生じさせる。また発振の始状態ではキャリアと光子の干渉により引き起こされる緩和振動が現れる。これらの現象を出来るだけ抑えることが変調特性を向上する上で特に重要となる。

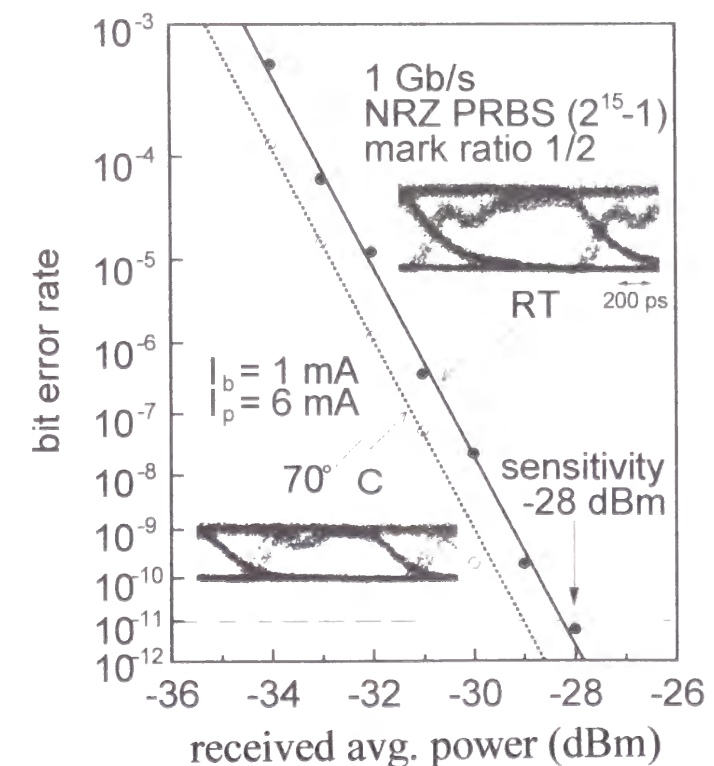


図 2.36 室温及び 70°C での符号誤り率特性及び光変調波形

図 2.36 に $I_b = 1 \text{ mA}$ 、 $I_p = 6 \text{ mA}$ での符号誤り率の温度依存性を示す。また各温度での光変調波形を図中に挿入してある。入力信号はマーク率 1/2 の 1 Gb/s 疑似乱数ビット列（ビット長 $2^{15}-1$ 、non return to zero, NRZ）である。受信にはアンプ内蔵型 InGaAs-APD（1 バランシェフォトダイオード NEC 製 NDL5522PC）を用い、両端突き合わせ（back-to-back）で測定した。70°C では室温に比べ光変調波形の高さが 0.6 倍に減少し、発振遅延時間が約 100 ps から約 200 ps に、立ち上がり時間のばらつき（シッタ）が 50 ps 以下から約 100 ps に増加するものの、キャリア寿命の減少により立ち上がり立ち下がり時の長寿命成分が減少し、むしろ誤り率は多少低くなっている。結果的に、 I_b 一定の条件で室温から 70°C までの温度範囲で符号誤り率 1×10^{-11} における受信感度 -28 dBm 以上が得られた。

上述のパルス過渡応答でみた変調特性は駆動電流を閾電流に対して大きく変動させる大信号特性に対応する。ここでは変調の周波数特性を示すために、一定の駆動電流付近で小振幅変調する小信号変調特性について示す。測定には DC から 10 GHz まで測定可能な網解析装置（ネットワークアナライザ HP 製 8719C）を用いた。図

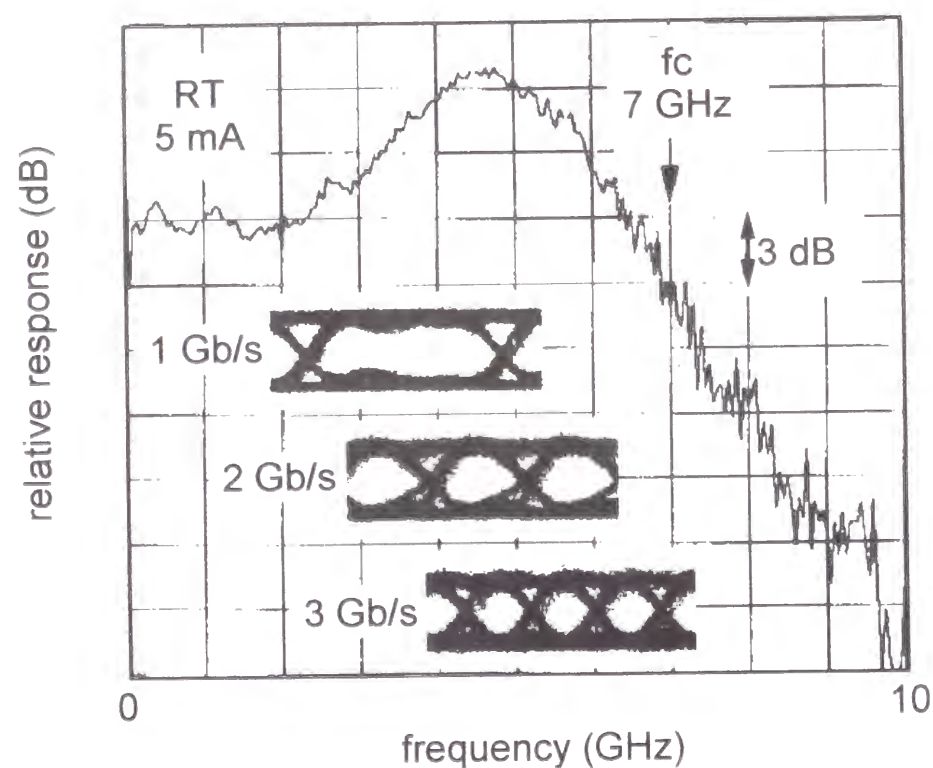


図 2.37 小信号変調特性と 1, 2, 3 Gb/s での光変調波形

2.37 に駆動電流 5 mA で小信号変調特性を示す。過渡応答において緩和振動が現れたと同様の理由で、4.7 GHz に最大値 22 dB の共振状現象が見られ、緩和振動周波数 f_r と呼ばれる。この緩和周波数 f_r はレート方程式 (2.26) より以下の様に解析的に得られる

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\tau_n \tau_{ph}} \left(\frac{I_p + I_b}{I_{th}} - 1 \right)} \quad (2.30)$$

従って、先の図 2.35 から求めた室温での τ_n を用いると、光子寿命 $\tau_{ph} = 1.6 \text{ ps}$ が求められる。これより以下の式で決まる Q 値 (quality factor) は 3200 と見積もられる。

$$Q = \omega \tau_{ph} \quad (2.31)$$

変調周波数を上げるともはや光子密度の変化は追従できなくなり、変調が急激に低下しロールオフ特性を示す。光変調出力が半分 (-3 dB) に低下する周波数を遮断周波数 f_c として 7 GHz が得られている。1996 年になり U. Fiedler らにより VCSEL 単体で 10 Gb/s の変調が可能であることが示されたが⁵⁴、64 チャネルを個別駆動可能なハッケーシング状態での VCSEL では本研究が最高の動作周波数である。この f_c を向上するにはロールオフを打ち消す程度まで f_r を増大させることが必要で、このためには発振閾値の増大が顕著にならない範囲で共振器の Q 値を下げ、光子寿命を減少させる以外に、光子密度及び微分利得を増大することで効果がある。光子密度の上限は通常、光出力端での破局的光学損傷 (catastrophic optical damage, COD) により決められているが、VCSEL では本質的に出力端での光強度が極めて低い構造を取っており、有利となる。微分利得のさらなる向上には活性層の量子ドット化等が有効と考える。

図 2.38 に本 VCSEL モジュールの遮断周波数 f_c のバイアス電流依存性を示す。レーザの変調特性を表す量 (figure of merit) として変調効率 (MCEF) が用いられ、

$$MCEF = \frac{f_c}{\sqrt{I - I_{th}}} \quad (2.32)$$

で与えられるため、図 2.38 では横軸のバイアス電流を $\sqrt{I - I_{th}}$ で規格化してある。利得飽和により、バイアス電流 3 mA 付近で f_c が飽和するまでの傾きから、MCEF は 5.0

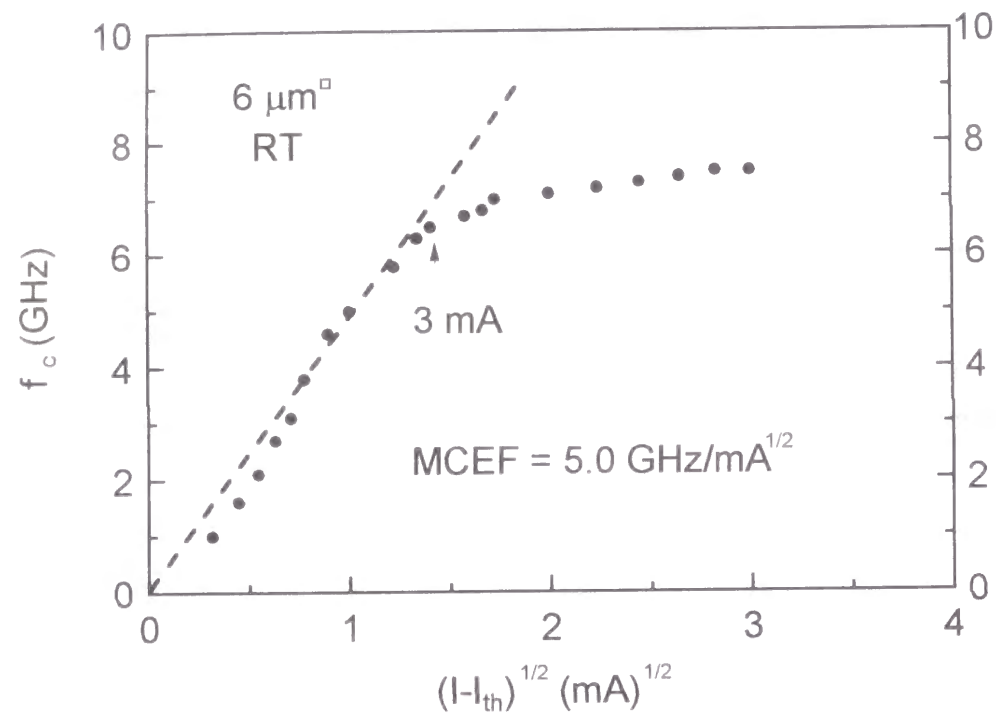


図 2.38 遮断周波数 f_c の駆動電流依存性

$\text{GHz}/\text{mA}^{1/2}$ と見積もられる。この変調効率は内部パラメータを用いて以下の式で表現できる

$$MCEF \cong \frac{1.55}{2\pi} \sqrt{\xi \frac{G v_g \eta_i}{q V_{eff}}} \quad (2.33)$$

ここで、 ξ は増大係数を表しており、VCSEL では活性層が定在波の腹の位置にのみ置かれているので、 $\xi \cong 2$ である。 G は微分利得、 v_g は群速度、 η_i は内部量子効率、 V_{eff} はモード体積を示している。 V_{eff} の減少により光子密度が増加し、 v_g の増加により光子寿命が低下することから、上述した f_c 増大のための条件と同様の方向であることがわかる。

実際には、寄生容量特に素子以外での容量が大きく影響する。ここでは VCSEL のメサ上の陽極パッドを実装に支障のない範囲で極力小さくすることにより、このような 7.0 GHz という高周波変調を実現している。実装上の拘束条件が無ければ 10 GHz 以上の変調も可能である。

2.7 まとめ

本章では、VCSEL 自体の素子性能を向上し、光データ伝送、光情報処理、光スイッチ等の応用に適用可能な水準にまで引き上げる検討を行った。VCSEL は素子寸法が全方向で波長程度であり、従来の端面発光型レーザで行われてきた近似解析では精度が不十分である。このために、3次元有限要素法を用いた計算機解析を行い、VCSEL の3次元的構造解析を行った。独自の横電流注入構造により構造の最適化を行い、発振閾値電流の低減を行うとともに、素子抵抗の上昇を防ぎ、端面発光レーザを遥かに凌ぐ 1 mA 以下の発振閾値電流と発振閾値における駆動電圧 2.1 V を実現した。閾値低減とともに外部微分量子効率も 40% まで向上させることにより電力-光出力変換効率約 11% を得、それぞれの特性ばらつきも閾値で 7%、効率で 5% にまで低減した。同時に実用上重要な縦横単一モード化によりモード不安定性を解消し、高周波変調を可能とした。実際に 1 Gb/s の変調速度で伝送評価を行い、バイアス電流一定の条件下、室温から 70°C までの温度範囲で符号誤り率 1×10^{-11} における受信感度 -28.3 dBm 以上を得た。また、変調効率にして $5.0 \text{ GHz}/\text{mA}^{1/2}$ と最高水準の特性を得た。

第3章 面発光レーザの光機能素子化

3.1 まえがき

本章では前章の面発光レーザをより発展させて、発光、受光、スイッチ、メモリ、増幅等の光情報処理に必要な機能をモノリシックに集積したスマートピクセル（光機能素子）について述べる。特に共振器構造を多重共振器化することにより、面発光レーザと同様の積層構造を持ちながら、受光素子としての受光効率及び受光帯域特性も格段に改善できることを初めて見出した。本構造はほぼ同時に研究が盛んとなった単一共振型 PD (photo detector) の研究に先行するものである。本構造は元々、電子系の二重量子井戸中における準位分裂からの類推により着想を得たものであり、結晶中の電子状態と類似性の高いフォトニック結晶へと展開する可能性を持つ。また本構造は最近話題となっている超周期構造回折格子 (super-structure-grating, SSG) レーザ⁵⁵ の原形ともなるものでもある。

3.2 面入出力光電融合素子 (VSTEP)

光信号を光のままに情報処理する“光情報処理”を実現する上で、最も基本的な要素機能として発光、受光、スイッチ、メモリ、増幅の5機能が挙げられる。これらの機能は光接続を構成する上でも重要となる。なぜなら光接続が機器間、ボード間、チップ間等と短距離の応用に進展していくと、その制御や、信号レベル再生のために電気処理系にかかる負担が増大するが、光素子自体に、閾値機能やメモリなどの機能を付加することによって中央処理系の負担を軽減でき、システム全体をコンパクトにできるからである。このような機能統合した光素子を光電融合スマートピクセルと呼び、独自の名称として VSTEP (面入出力光電融合素子: vertical-cavity surface-transmission electro-photonic device) と以降呼ぶ。

この VSTEP を巧みに利用することにより図 3.1 に概念的に示した“光セルフルーティング” (光自己進路決定) スイッチを構築でき、光情報処理あるいは機能性光接続の基本構成として重要な役割を果たす。光データ信号の先頭にはその行き先を指定するヘッダ信号が付けられており、これが複数個の VSTEP に入ると特定の VSTEP のみが活性状態 (オン状態) となり、後続の光データ信号が指定の方向に進むことができ

る。コンピュータの分野では分散処理型のシステムが主流の流れになってきており、光接続への期待が高まってきているが、この場合にも光セルフルーティングを用いた機能性光接続は重要となる⁵⁶⁻⁵⁸ (詳細については本章の最後 (第6節) に示す)。

発光、受光、スイッチ、メモリ機能を併せ持つ VSTEP の基本構成として、図 3.2 に示す構造を研究してきた。pnpn 組成よりなるサイリスタの中央に光吸収層兼発光層となる活性層を挿入した構造で、初期には発光ダイオード (light emitting diode, LED) モードでの発光であった。図 3.3 を参照しながら以下にその動作原理を説明する。基本的にサイリスタ構造を持つことから I-V 特性に図のようない線型性が現れ、一定の閾電圧 (スイッチ電圧 V_s) までは高抵抗な休止状態 (オフ状態)、これを超過し、低抵抗化してオン状態 (保持電圧 V_h) となる。オフ状態において光入射 (P_m) することにより、スイッチ電圧 V_s が図 3.3 のように低下する。したがって、 V_s と V_h の間の一定バイアス電圧下で光入射することにより、オン状態を誘発することが出来る (受光及びスイッチ機能)。その後は素子電圧を負側に振ってキャリアを強制的に引き抜くまでは一定時間オン状態を保持し (メモリ機能)、その間発光させることができる (発光機能)。

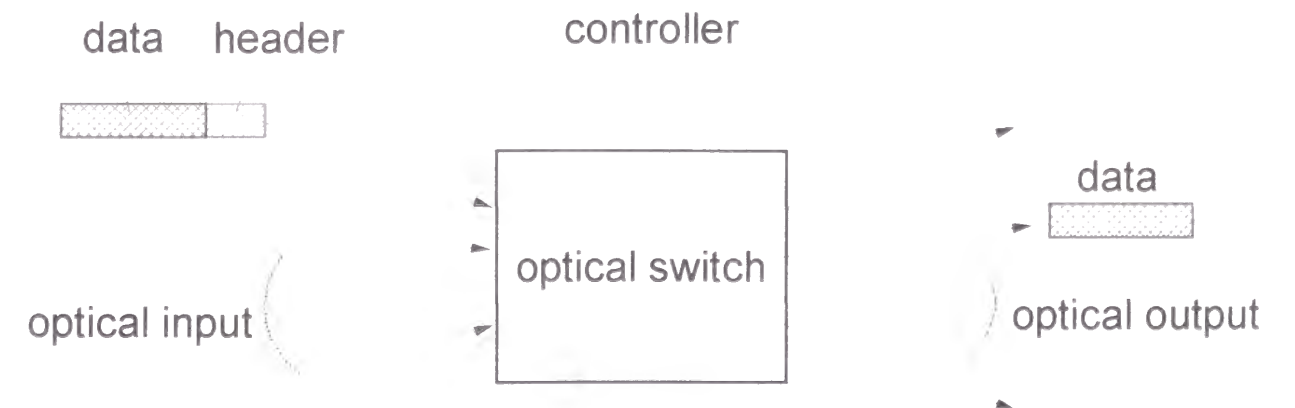


図 3.1 光セルフルーティングスイッチの概念説明図

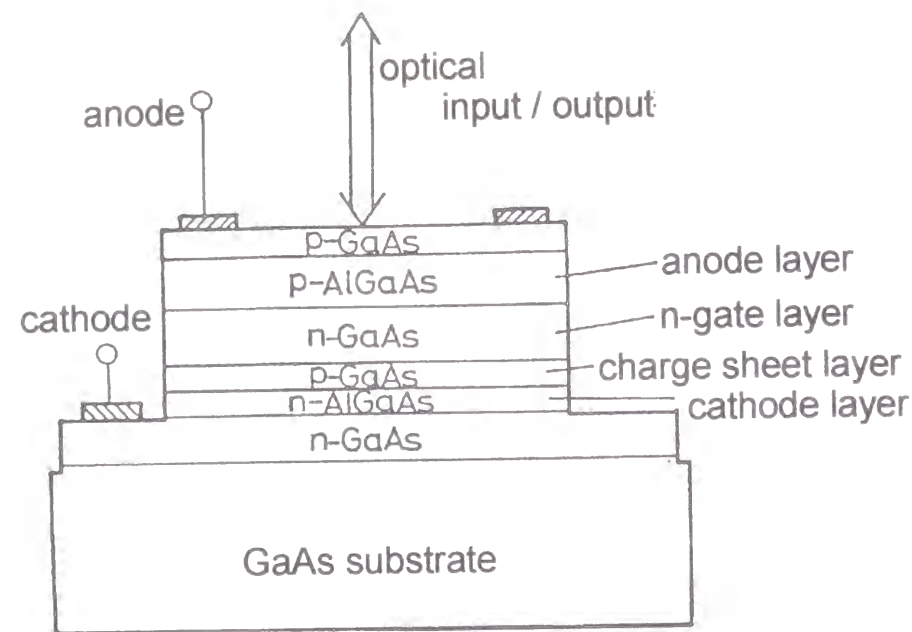


図 3.2 初期の LED モード VSTEP の構造概略図

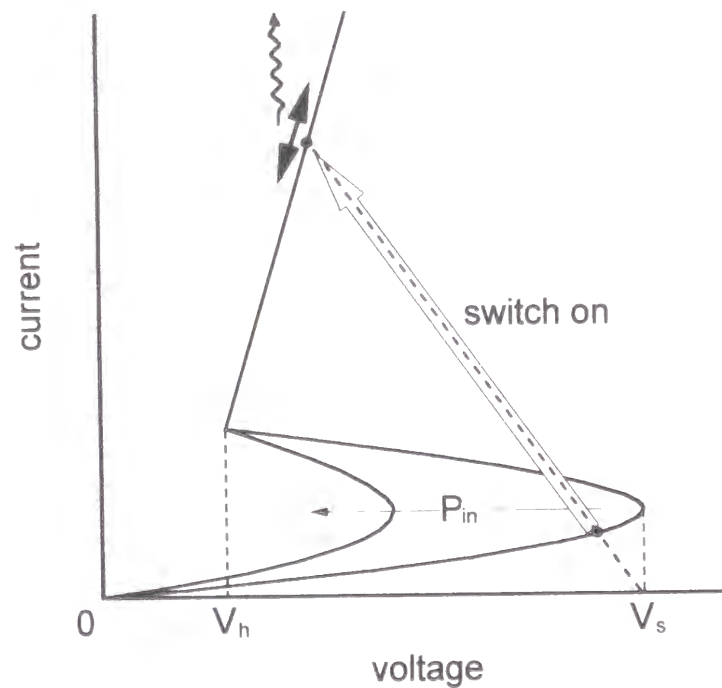


図 3.3 VSTEP のスイッチ動作原理を説明する図

図 3.4、図 3.5 および図 3.6 に VSTEP 以外の代表的な光機能素子の概略構造を示す。図 3.4 は SEED⁶⁰⁻⁶⁴ と呼ばれるものであり、self-electrooptic effect device の略である。GaAs/AlAs 多重量子井戸 (multiple quantum well, MQW) における量子閉じ込めシュタルク効果 (quantum confined stark effect, QCSE) を利用し、吸収端波長を入射光に応じて変化させ、光入力光出力の高速光変調素子として機能するものである。原理的には 1984 年にベル研究所の D.A.B. Miller⁶⁰ により考案されたものであり⁶⁰、その後改良が重ねられ、差動動作を取り込むことにより高感度及び高速応答特性を持つ S-SEED (symmetric-SEED) に発展した^{63, 64}。

図 3.5 は NTT の黒川らによって考案された EARS⁶⁵ と呼ばれる光変調器であり、exciton absorptive reflection switch の略である。SEED と同様 QCSE の原理を用いながら、MQW に直列にヘテロフォトリランジスタ (HPT) を内臓することにより、より高感度の光入力光出力光変調を可能としている。

図 3.6 は京大の野田らによって考案された光電集積三重安定素子⁶⁶⁻⁷²である。半導体レーザ構造を集積化することにより上記光変調器に比べて消光比を格段に向上し、三重安定特性を生かした信号の書き込み (set)、消去 (reset) 機能を可能としている。

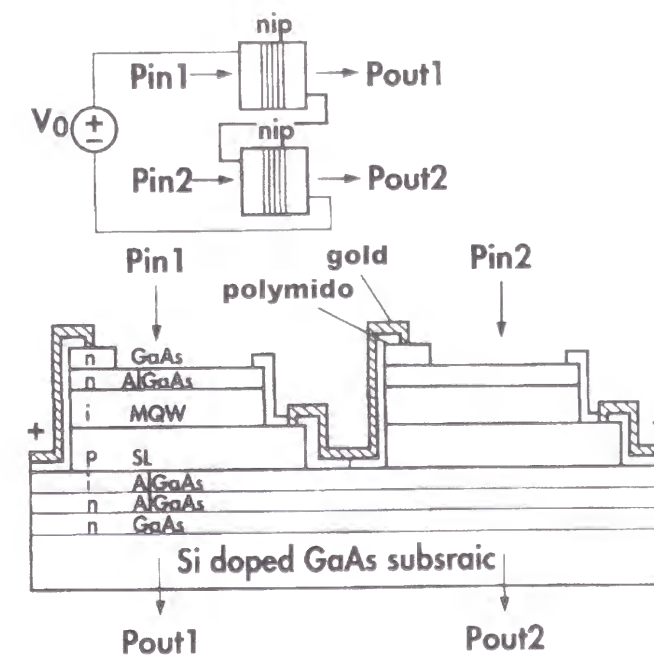


図 3.4 SEED の素子構造

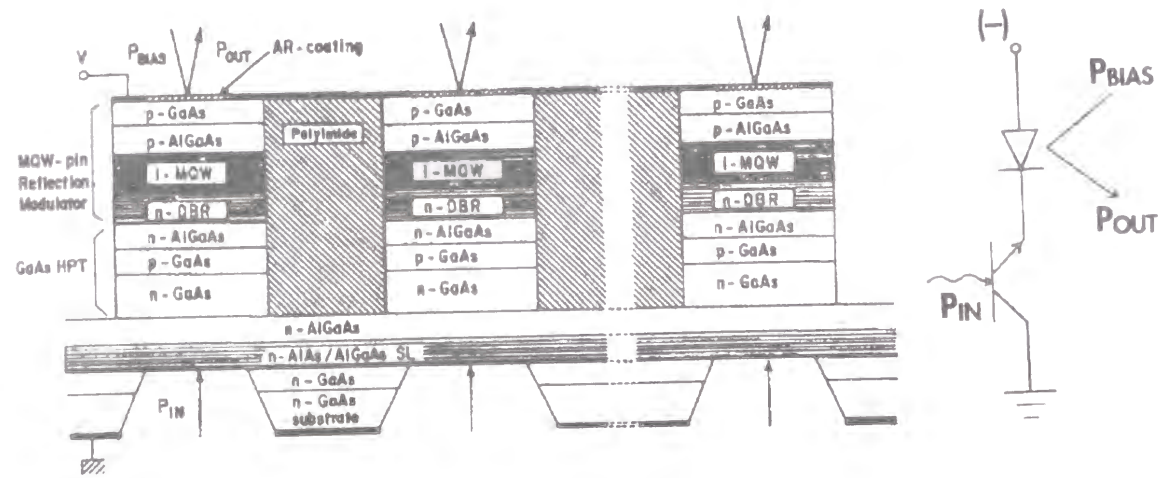


図 3.5 EARS の素子構造

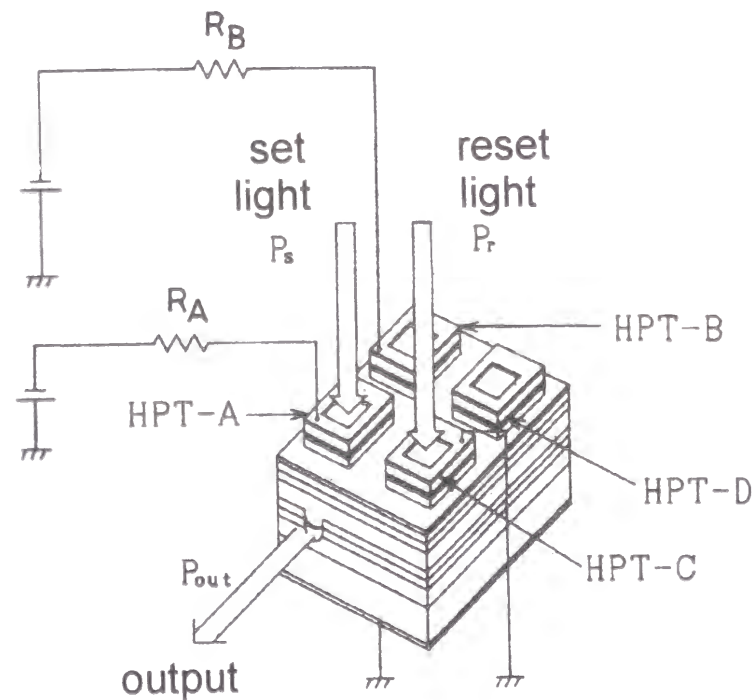


図 3.6 光電集積三重安定素子の素子構造

3.3 VCSEL 型 VSTEP (VC-VSTEP)

本研究では前記 VSTEP の npn 組成の前後を DBR で挟み込んで垂直共振器を形成し面発光レーザ構造として、VCSEL 型 VSTEP (VC-VSTEP) を実現した。この構造により、発光素子としての機能を格段に向上することが可能となり、光信号レベルの再生に必要な増幅の機能をも付加することができた。また、発光素子としても多重共振器効果及び逆印加時の QCSE の積極利用により受光感度を格段に増強できることを本研究で初めて明らかにした。

3.3.1 LED 型 VSTEP との比較

初期の VSTEP は図 3.2 に示した様な LED モードでの発光であり、電気-光変換効率やスピードの点で十分な特性を得る事が難しかった⁷³。また VSTEP を 2 次元状に配列して空間並列接続を行う場合、LED モードの発光であるので光は等方的に出射され、素子間の信号干渉が問題となって高密度化が制限される。そのため⁴⁵ 反射鏡を端面に形成したレーザモード VSTEP を検討したが、これでは水平共振器のために素子が小型化できない、吸収層・活性層分離型のため同一波長での光吸収効率が悪いなどの問題があった⁷⁴。

これに対し、VC-VSTEP では、図 3.7 に示す様に、VCSEL の中間層に VSTEP 構造

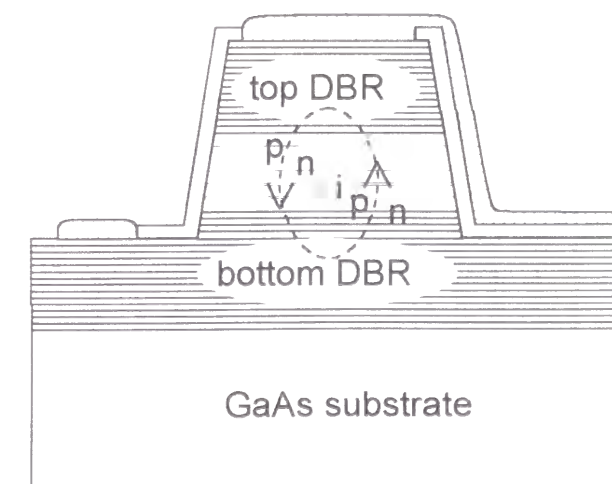


図 3.7 VC-VSTEP の構造概略図

を取り込んだ形になっている⁷⁵ 双方向あるいは多段接続可能な2次元光接続⁷⁶を実現するためには、受光機能が不可欠となるが、VC-VSTEPでは、オフ時には活性層が吸収層として機能する。この構造の特徴は、垂直共振器構造による吸収増大効果で、吸収波長域と発振波長の一致が期待できる点にある。

すなわち、上下DBRの層数を最適化することによって吸収層兼活性層厚が合計300Åと非常に薄いに関わらず100%近い吸収率を得ることができる。またレーザの発振波長は活性層の吸収領域よりも低エネルギー側にあり、その波長では吸収層（活性層）の吸収係数が小さくなってしまふことが懸念される。しかし、この素子では、オフ時には逆電圧が印加され、それに伴うQCSEで吸収域が長波長方向に移動するので、これによってレーザ光が効率よく吸収される。これらについて以下順に説明する。

3.3.2 垂直共振器構造による吸収増大効果

VC-VSTEPでは活性層厚を3層合わせても300Åしかない。この活性層が、VC-VSTEPのオフ時には吸収層となる。このような薄い吸収層の一回の通過で得られる光吸収率は、吸収係数を3000 cm⁻¹⁷⁷とすると1%にすぎない。ところが実際には、DBRによる多重反射の効果（共振器効果）で吸収率は2桁大きくできる。この理由を、概念図（図3.8）を用いて説明する。

活性層を含む中間層の厚さは媒質内共振波長の整数倍に設定してあるが、このために、入射した光のうち下部DBRで反射される光と上部DBRで反射される光は逆位相

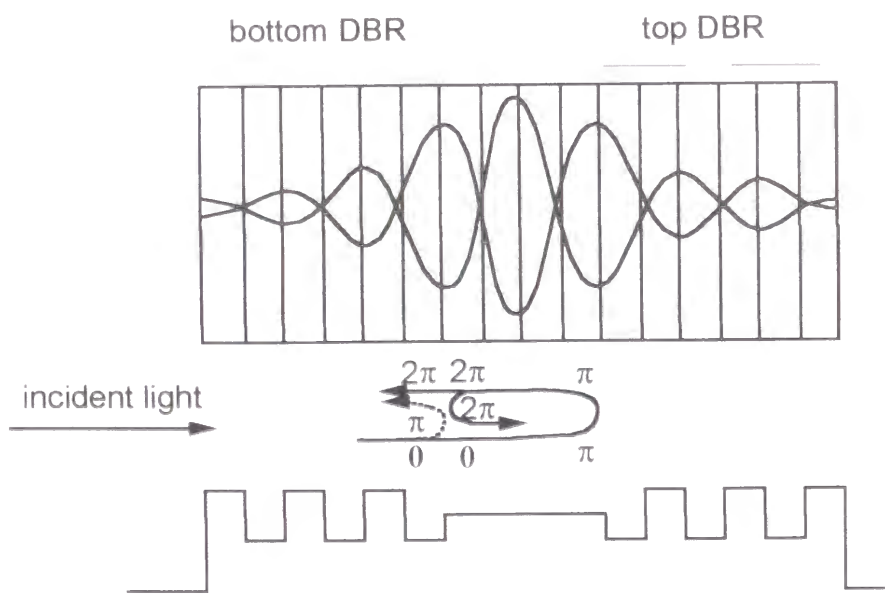


図 3.8 吸収増大効果の概念図

となる。したがって、共振器により共振する波長の光は、上下の反射面では最も強く反射されるが、位相が逆になるために互いに打ち消し合ってしまう。そこで、活性層で生じる吸収係数を考慮して上下DBRの反射率を最適化すれば、反射も透過もほとんど0にすることができ、吸収率を大きくすることができる。この最適化条件は、吸収が吸収層のみで生じると単純化したモデルでは、

$$R_b = T_b^{-1} \cdot R_a e^{-2\alpha d} \tag{3.1}$$

のように簡単に表せる。実際には、ドーピングにより他の層での吸収も無視できず、正確には数値解析を行う必要がある。

図3.9には、上部DBRを29層、活性層の吸収係数を3000 cm⁻¹としたときの量子阱体での光吸収率を下部DBR層数に対して計算したものである。これよりわかるように、下部DBR数を19層としたときに最大の吸収率（99.2%）が得られることがわかる。図3.10、図3.11にはこのような最適構造にした場合の反射・透過・吸収率を示した。共振波長において急峻な吸収ピークが現れる様子が見える。また図3.12には、この構造で基板側から振幅1の光を入射したときの素子中の光強度分布を示し、活性層のある位置に光強度の集中する様子が良くわかる。

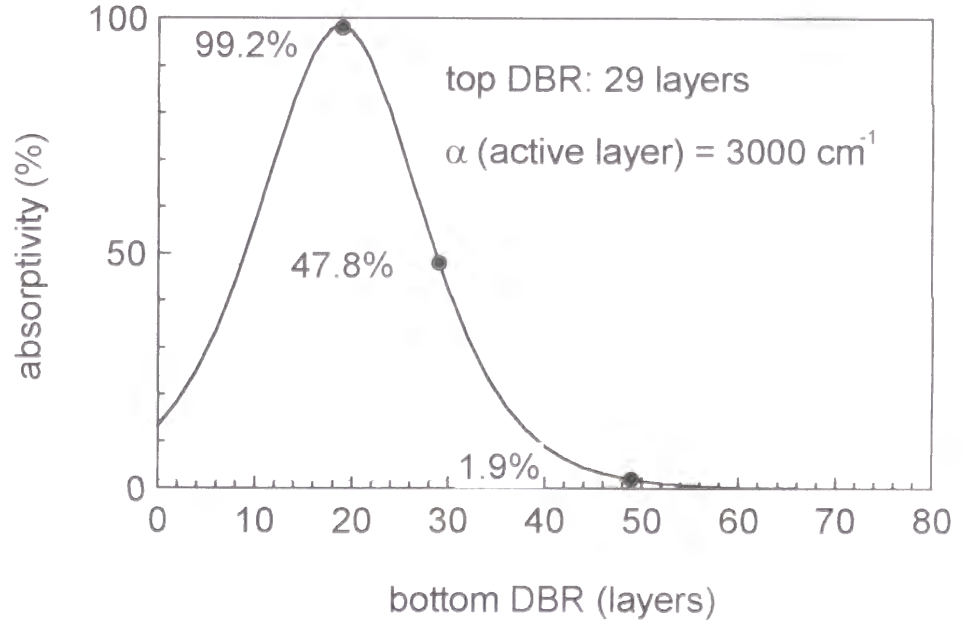


図 3.9 吸収率の下部 DBR 数依存性

しかしながら、この吸収に最適化した構造では発振閾値が増大してしまうので好ましくない。発振閾値と吸収率の両特性を考慮すると、下部 DBR の層数を 29 層程度とするのが適当である。このとき、発振閾値利得は 1500 cm^{-1} と最適値の 3 倍程度上昇するか、吸収率は 48% となり 49 層の場合の約 30 倍も増大する。

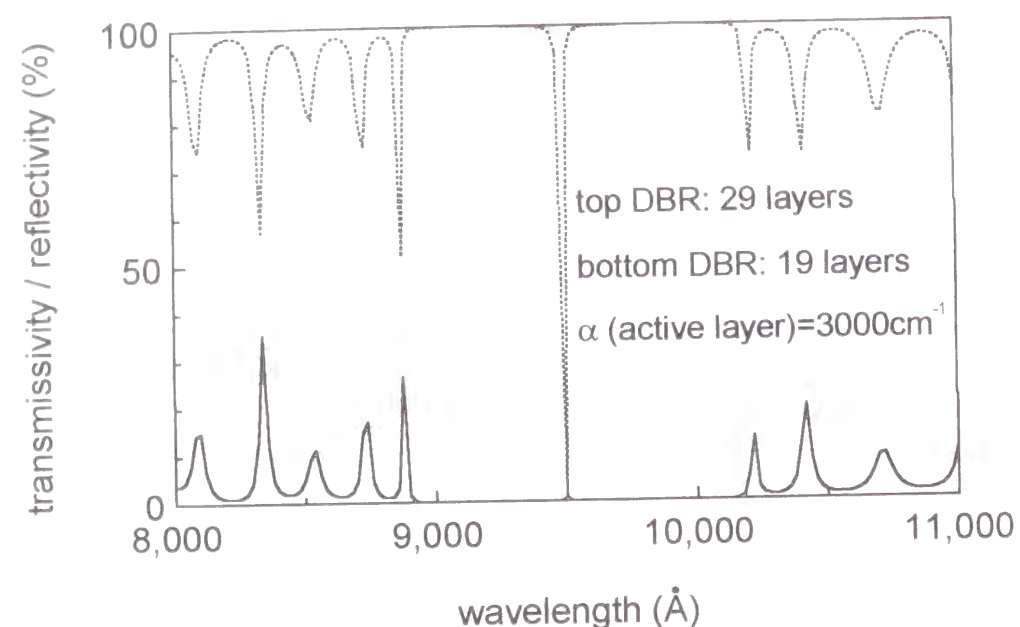


図 3.10 吸収最適時の反射率スペクトル（点線）と透過率スペクトル（実線）

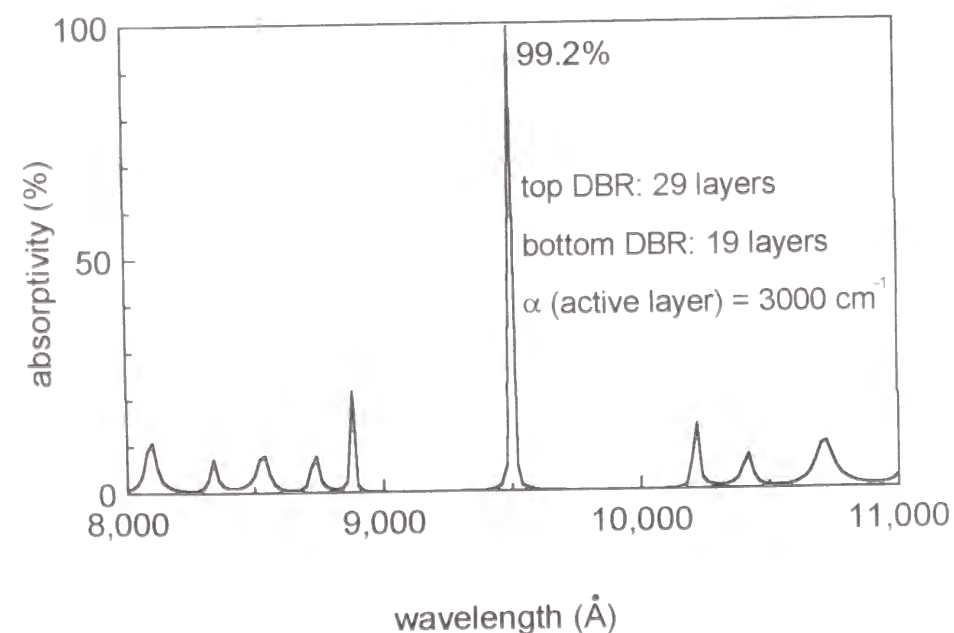


図 3.11 吸収最適時の吸収率スペクトル

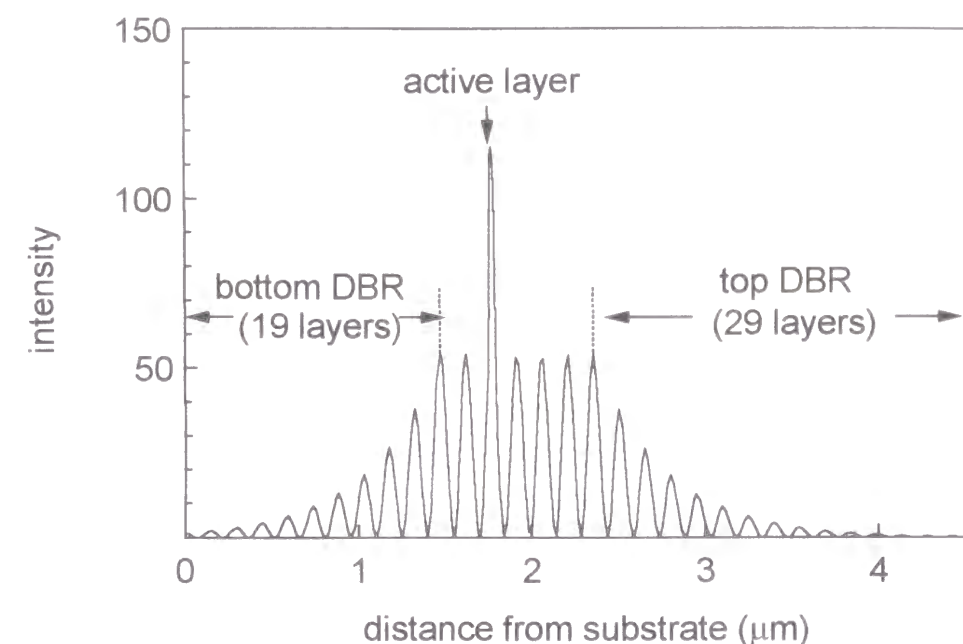


図 3.12 吸収最適時の素子内部の光強度分布

3.3.3 吸収波長域とレーザ発振波長の一致

VSTEP を多段接続するためには、オフ時の吸収波長域内にオン時の発振波長がうまく入っている必要がある。ところが、VC-VSTEP では発光としてレーザ発振を用いているために、発光はバンド端付近で起こり、これは吸収が立ち上がり始める基礎吸収端に対応している。活性層がバルクである場合には吸収帯がブロードで発振波長ごもある程度の吸収が得られるが、多重量子井戸を用いた VC-VSTEP では吸収帯に励起子ピークが現れ、発振波長はこの励起子ピークのすそに対応する。従って、通常の状態では発振波長での吸収率は極めて小さい結果になってしまう。そこで、吸収時に以下に示す量子閉じ込めシュタルク効果を利用して、オフ時には励起子吸収ピークを低エネルギー側に移動させることにより、意図的に発振波長に波長を合わせる工夫が必要となる。

図 3.13 は、GaAs を活性層とするレーザ（端面発光レーザ）の吸収スペクトルにレーザ発振波長（ E_L ）と表面発光ピーク（ E_s ）を併記したものである。ここで実線は活性層が MQW 構造の場合を、破線はダブルヘテロ（double hetero, DH）構造の場合を示す。縦軸の吸収係数には光閉込め係数を示している。MQW 構造の場合、吸収ピーク波長は表面発光ピークとほぼ一致しており、レーザ発振波長はこれよりさらに 20 meV 程度低エネルギー側にあることがわかる⁷⁸。これは、キャリア注入によって引き起こされる電子相互作用によるバンドギャップ縮小効果として説明される^{79, 81}。DH 構造ではスペクトルがなだらかなため、レーザ発振波長においても十分な吸収が得られるが、MQW 構造では励起子吸収による先鋭化のため、レーザ波

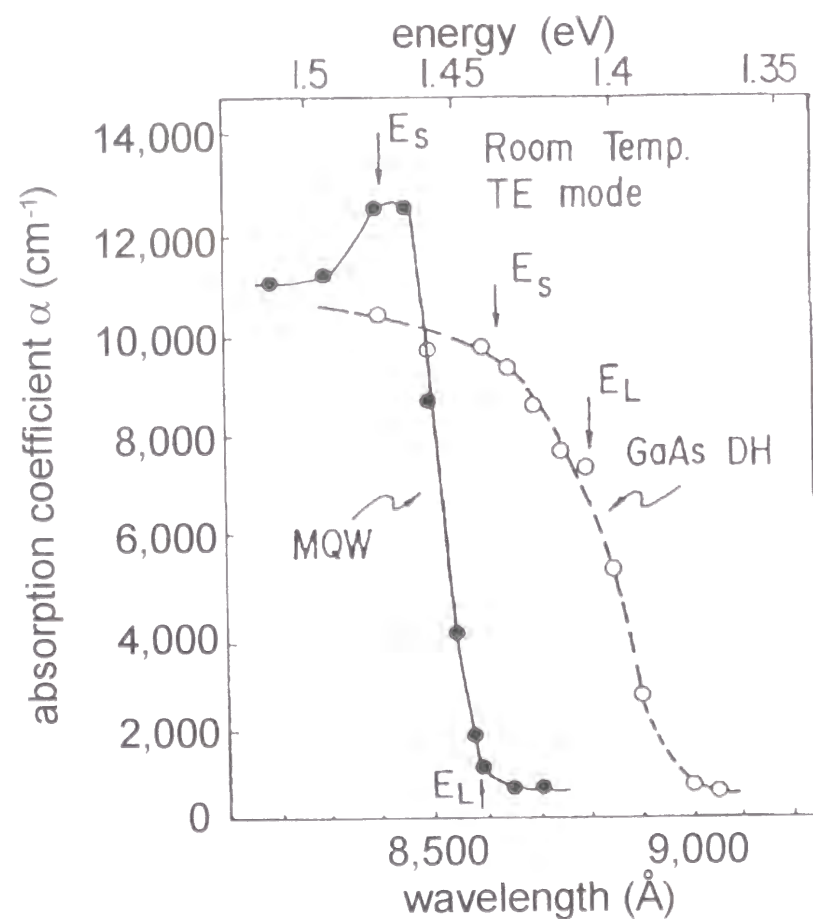


図 3.13 量子井戸（実線）及びバルク（破線）レーザの吸収スペクトル及びレーザ発振波長（ E_L ）

ではほとんど吸収がないことがわかる

図 3.14 は GaAs 量子井戸（井戸層厚 105 Å、障壁層 $Al_{0.32}Ga_{0.68}As$ ）の吸収スペクトルの電界依存性を示したものである⁸²。電界を印加するに従い、QCSE によって吸収ピークが長波長側に移動していく様子がわかる。図 3.15 に同構造での吸収ピーク波長移動量の電界依存性を示す。約 100 kV/cm の光強度で上記励起子吸収ピークの波長差

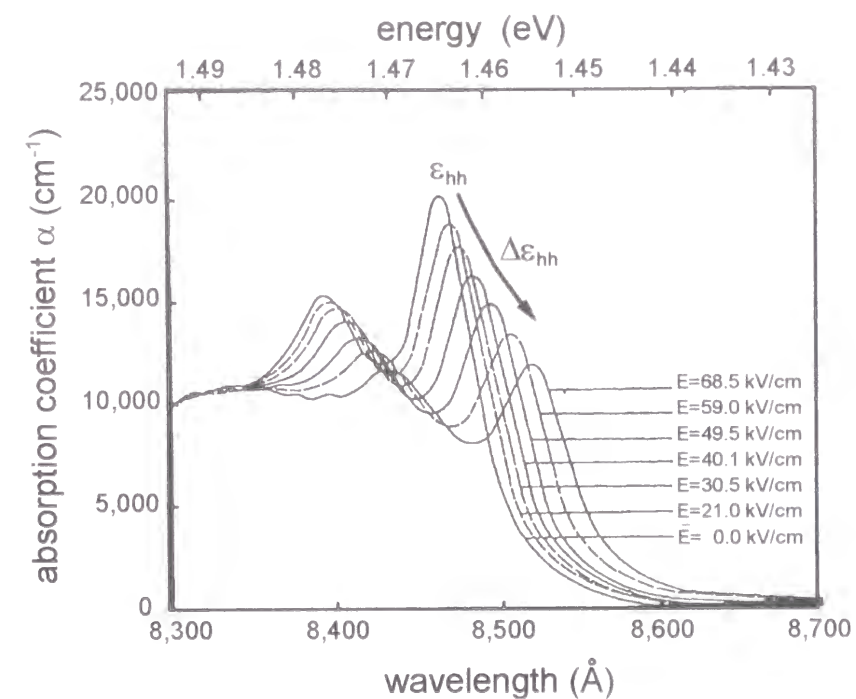


図 3.14 QCSE による GaAs 量子井戸の吸収スペクトルの電界依存性

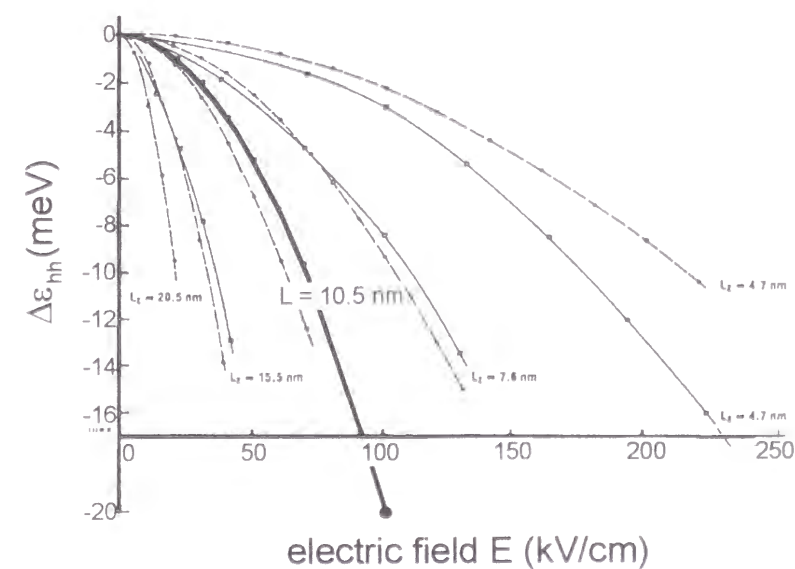


図 3.15 QCSE による吸収ピーク波長移動量の電界依存性

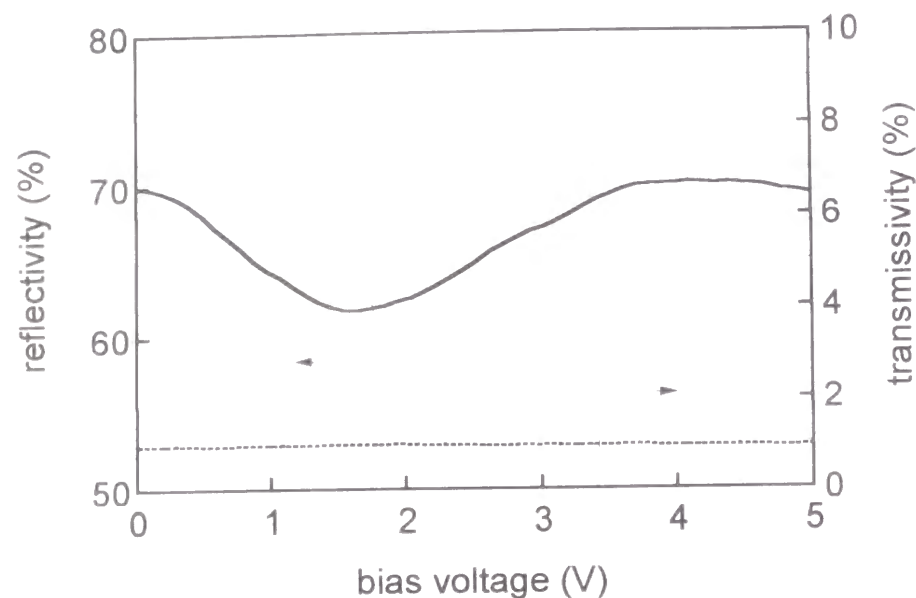


図 3.16 VC-VSTEP で測定した反射率及び透過率の逆印加電圧依存性

に相当する 20 meV の移動量を得ることができる VC-VSTEP の活性層周辺の非ドープ領域は約 2000 Å であるから、

$$d \cdot E = 2 \times 10^{-5} \times 10^5 = 2V \quad (3.2)$$

となり、約 2 V の逆電圧印加で吸収ピーク波長と発振波長が一致することになる 図 3.16 に実際に VC-VSTEP で測定した反射率と透過率の逆印加電圧依存性を示す 100% から反射率と透過率を引いて得られる吸収率のピークは 1.6 V 付近にあり、上記見積もりの 2 V とほぼ一致していることがわかる。

以上の様に、VC-VSTEP の構成を用いれば、発光素子としての最適化と共に、吸収素子としても同時に最適化が行えることがわかる

3.4 二重共振器型受光素子と単一共振器型面発光レーザ分離構造

前節の様に、単一素子で発光と受光を兼ねようとする VC-VSTEP では、発光、受光特性のある程度の妥協が必要であり、それぞれの機能を真に最適化することは出来ない 特に受光部では、QCSE による吸収増大効果が見込まれるものの単体の受光素子としては特にその受光波長帯域に制限があり、発光部最適化との相反関係は 層深刻となる この関係を定量的に図 3.17 に示す 実用上十分な数 10 Å の波長帯域を得るには下部 DBR を 9 層以下にする必要があり、この時の発振閾値は桁違いに増大することがわかる そこで更に設計に自由度を増やすため、発光部と受光部を空間的に分離し集積化する工夫を行った。しかし、完全に異なる構造としたのではスマートヒクセルとは呼べず、また高密度に集積することは困難となる 本研究は、発光部、受光部ともにほぼ同一の層構造としながらも、受光部にのみただ 1 層の位相整合層（スペーサ層）を挿入するだけで両構造を最適化する方法を考案し、実際にその効果を検証した。このスペーサ層の挿入により、受光部は 二重共振器構造 (double-vertical-cavity photo-diode, DVC-PD) となり、受光効率及び受光帯域を大幅に改善できることを本節で示す。特に、受光帯域は単一共振器に比較してより理想的な平坦な吸収スペクトルを得る事ができる 本構造により、簡単な層構造の変化だけで受光部と発光部を個別

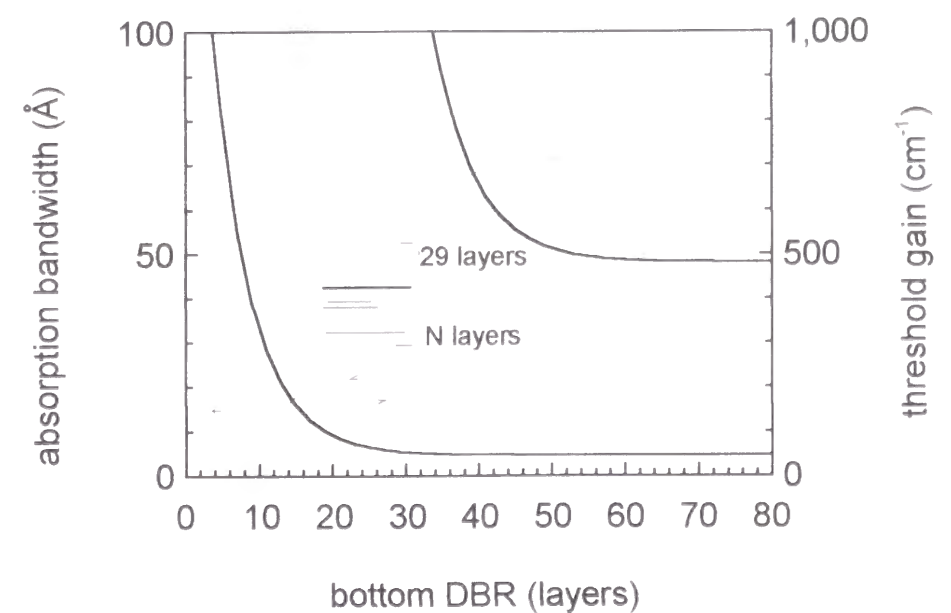


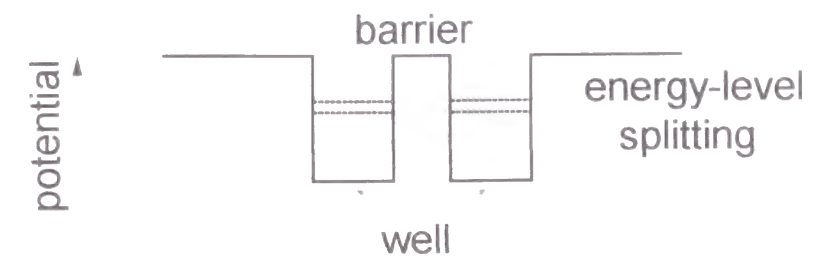
図 3.17 吸収帯域と発振閾値利得の下部 DBR 数依存性

に最適化でき、受光部と発光部を数 μm 程度に隣接させられるので、高集積化が可能となる。本二重共振器構造は多重量子井戸中の電子からの類推により多重共振器構造導入の着想を得、まずは計算機解析により様々な構造パラメータでの受光特性を解析し、最適構造を決定した。また、実際に二重共振器構造の場合について素子作製を行い、多重共振器導入による広波長帯域化の効果を初めて検証した。本研究とほぼ同時期に光変調素子においても共振器を複合化するという研究が始まったが、光入射側反射鏡としてバルク端面を利用するものである^{83, 85}。本研究の多重共振器 VCSEL では共振器を構成する反射鏡を全て DBR としているため、設計の自由度を格段に増やすことができる。

3.4.1 二重共振器型受光素子の動作原理及び設計指針

同一波長で共振するように設計された複数の共振器を結合した場合、共振波長の分裂が生じる。このことは図 3.18 (a) に模式的に示したように単一量子井戸が複数個、結合することによって縮退が解け、いくつかの準位が形成され、さらに井戸数を増やすとミニバンドが形成されることの類似で理解できる。VC-VSTEP の場合には図 3.18 (b) に示すように DBR 及びスペーサ層によって共振器が構成されており、これを垂直に複数積層することによって多重共振器が形成される。スペーサ層が量子井戸に、中間 DBR が量子障壁に対応する。分裂した共振線の各々の線幅は、それぞれの共振器に閉じ込められた光子寿命の逆数で決まり、またそれらの間隔は、光が一つの共振器に局在した状態から他の共振器に局在した状態へと移動する時間の逆数で決まる。このため、VC-VSTEP の場合、個々の共振器を構成する DBR 層数を増やすほど線幅は狭くなり、また量子井戸を隔てる障壁に相当する共振器間の DBR の層数を増やすほど分裂幅は狭くなる。この関係を念頭において吸収スペクトルができるだけ平坦で広帯域になるよう、各々の DBR 層数を設計する。

(a) DOUBLE QUANTUM WELL



(b) DOUBLE CAVITY

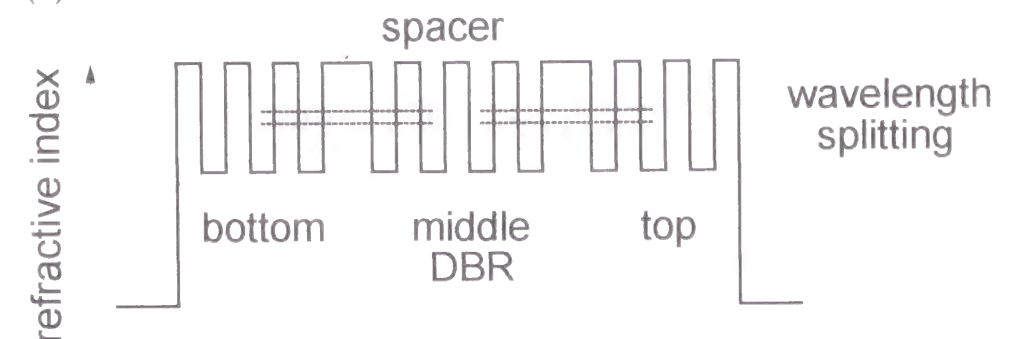


図 3.18 二重共振器による吸収帯域拡大の原理説明図

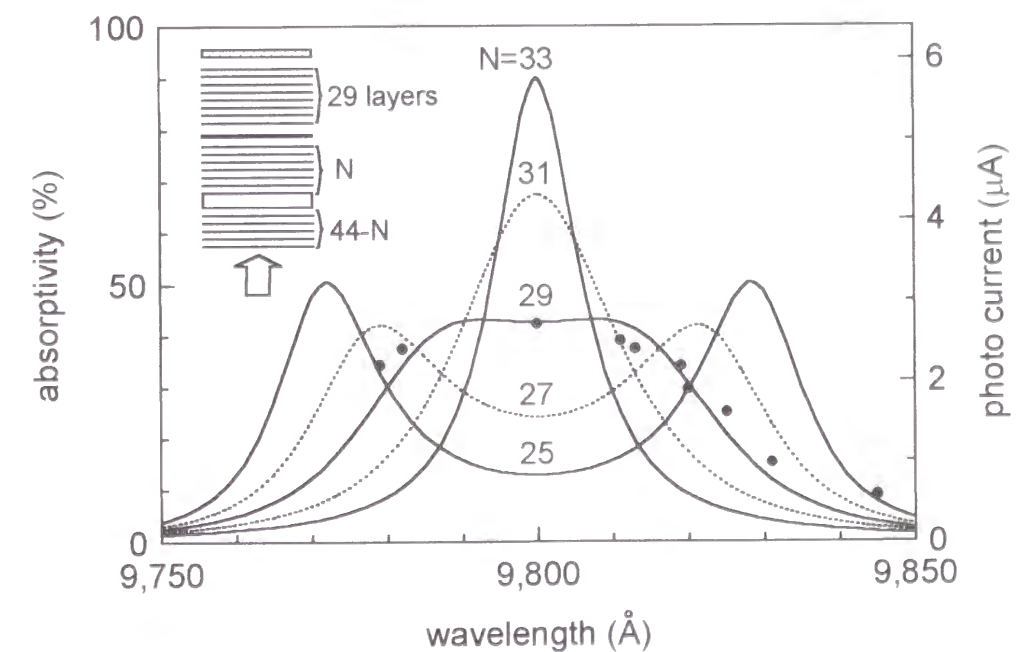


図 3.19 二重共振器の吸収率スペクトルの中間 DBR 数依存性 ●印は光電流の実験値

図 3.19は VC-VSTEP の具体的な構造定数を用いて計算した二重共振器構造の吸収スペクトルである。上部 DBR は金蒸着された陽極電極からの反射を含めて十分な反射率が得られるよう 29 層と固定し、中間 DBR を 25 から 33 層まで変化させている。このとき下部 DBR は、中間 DBR との合計層数が 44 層となるよう変化させている。これは、後で図 3.28 に示すように下部 DBR と中間 DBR の合計層数が発光部の下部 DBR 層数となり、これが発光部の特性を決定するからで、発振閾値が十分低減されるよう設定してある。吸収層は上部 DBR と中間 DBR との境界部にあり、吸収係数を 3000 cm^{-1} と仮定してある。本図 3.19 より中間 DBR が 29 層のときに吸収スペクトルが最も平坦となることがわかる。

3.4.2 素子構造

図 3.20 に本素子の概略構造を示す。本素子は二重共振器構造を有する受光部と単一共振器構造を有する発光部によって構成されている。基本的な層構造は受光部と発光部において共通であり、唯一異なるのは受光部の入射側 DBR にのみ $\lambda/2$ 厚のスペーサ層が挿入されていることである。このスペーサ層により受光部は二重共振器構造となっている。

詳細構造を受光部を例にとり以下に説明する（図 3.20 参照）。まず GaAs 基板（n 型）上に GaAs バッファ層を形成し、この上に n-GaAs（膜厚 515.4 Å ，ドーピング濃度 $2 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ ）と n-AlAs（膜厚 649.4 Å ，ドーピング濃度 $2 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ ）の交代多層膜よりなる n 型の下部 DBR、n-GaAs スペーサ層（膜厚 1210.8 Å ，ドーピング濃度 $2 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ ）、n-GaAs（膜厚 515.4 Å ，ドーピング濃度 $2 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ ）と n-AlAs（膜厚 649.4 Å ，ドーピング濃度 $2 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ ）の交代多層膜よりなる n 型の中間 DBR を形成する。さらにその上に陰極層となる $\text{n-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ （膜厚 1553.9 Å ，ドーピング濃度 $2 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ ）、下部閉じ込め層となる $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ （膜厚 1000 Å ，非ドーブ）、活性層兼吸収層となる $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ （層厚 100 Å で 100 Å の非ドーブ $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ バリヤー層を挟んで 3 層，非ドーブ）、上部閉じ込め層となる $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ （膜厚 1000 Å ，非ドーブ）、陽極層となる $\text{p-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ （膜厚 1548.7 Å ，ドーピング濃度 $5 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ ）を形成する。そしてさらに p-GaAs（膜厚 515.4 Å ，ドーピング濃度 $3 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ ）と p-AlAs（膜厚 633.7 Å ，ドーピング濃度 $3 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ ）の交代多層膜よりなる p 型の上部 DBR、p-

GaAs よりなる位相補正層（膜厚 1050.4 Å ，ドーピング濃度 $1 \times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ ）を分子ビームエピタキシ（molecular beam epitaxy, MBE）法で形成する。

各 DBR では素子抵抗低減のために、GaAs 層と AlAs 層の境界部に 20 Å から 180 Å まで膜厚を徐々に変化させた GaAs と AlAs からなる疑似組成傾斜構造が形成されており、これを含めた各層の厚さが設計共振波長/有効屈折率/4 になるように設定してある。各 DBR 層数は上部 DBR で 29 層、中間 DBR で 29 層、下部 DBR で 15 層積層してある。多層膜形成後、素子部をメサ状に中間 DBR までエッチングし、その上に p 電極として AuZn を基板側に n 電極として AuGeNi を蒸着してある。素子寸法は発光部 $10\text{ }\mu\text{m}$ 角、受光部 $30\text{ }\mu\text{m}$ 角とした。

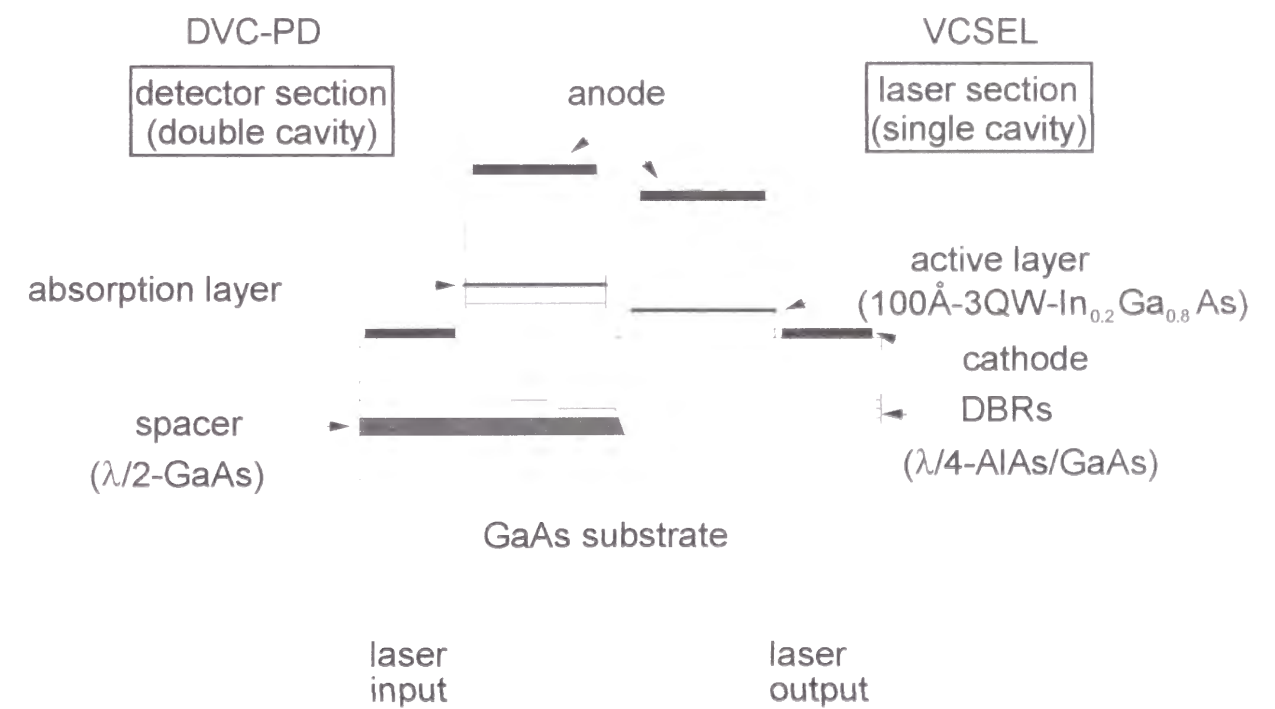


図 3.20 DVC-PD, VCSEL 分離構造の概略図

3.4.3 素子特性及び考察

図 3.21 は二重共振器受光部における $10\ \mu\text{W}$ 光入射、 $2\ \text{V}$ 印加時の光電流（フォトカレント）の入力光波長依存性（黒丸）と、これを計算により求めた吸収率スペクトル（実線）でフィッティングしたものである。評価用レーザ光源の波長限界のため、短波長側のデータが不足しているが、測定範囲内での形状は良く一致している。また、

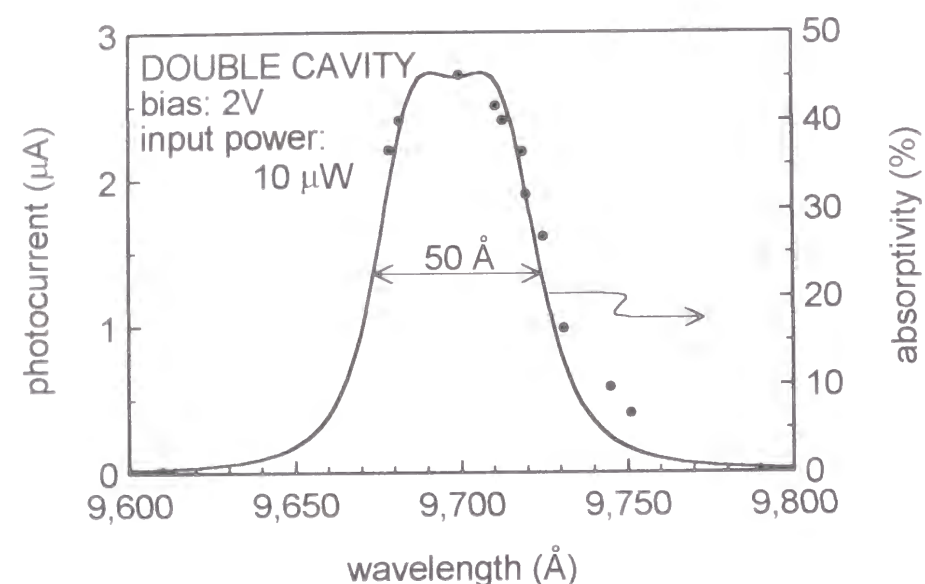


図 3.21 DVC-PD の光誘起電流スペクトル ●は実験点 実線は吸収率の計算曲線

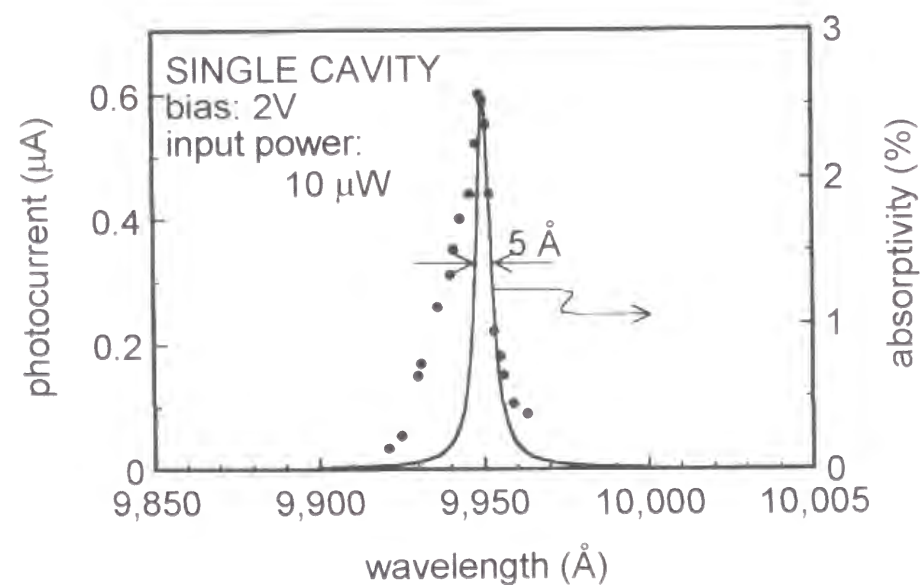


図 3.22 VCSEL の光誘起電流スペクトル ●は実験点 実線は吸収率の計算曲線

比較のために図 3.22 に単一共振器となる VCSEL 発光部における同様の測定・計算結果を示す。測定値が短波長側に $5\ \text{\AA}$ 程度広がっていることを除き、実験値は非常に良く一致している。この短波側への広がりが高次横モードによるものであり、寸法を $6\ \mu\text{m}$ 角程度まで微小化すれば、単一横モードとなり計算曲線と一致するに違いない。二重共振器においても、短波長側で測定をすれば同様の広がりがあることが予想されるが、仮に計算曲線と同様の形状を示すとしても、その受光帯域は $50\ \text{\AA}$ となり、単一共振器の $10\ \text{\AA}$ に比べて 5 倍の広帯域化が図られることになる。高次横モードの影響のない微小メサでは 10 倍の効果が予想される。この $50\ \text{\AA}$ の受光帯域は、発光素子の電流加熱による温度上昇による波長変動 ($0.63\ \text{\AA}/^\circ\text{C}$) に換算して 80°C に相当し、素子ばらつきを考慮に入れても 2 次元光接続に十分な帯域である。

受光効率の絶対値は図 3.22 で示したように、光吸収電流にして単一共振器で $0.6\ \mu\text{A}$ 、二重共振器で $2.7\ \mu\text{A}$ と 4.5 倍の向上が図られている。この相対比から二重共振器での受光効率は 43% と見積もられる。この値は内部量子効率から基板及び DBR 内での自由キャリアによる吸収損失（約 10%）と空乏層内でのキャリアによる再結合吸収損失を差し引いたものである。図 3.23 は $10\ \mu\text{W}$ 光照射時の光吸収電流と暗電流の印加電圧依存性を示している。スイッチ直前での光吸収電流は、単一共振器の $8\ \mu\text{A}$ に対して二重共振器では $200\ \mu\text{A}$ と電力-光出力変換効率にして 26 倍であり、そのときの暗電流は $10\ \text{nA}$ 程度と十分な S/N 比が得られている。受光効率を 43% としても 60 倍の光増倍率を得たことになる。

図 3.24 に $10\ \text{mA}$ 電流注入時の発光スペクトルを示した。単一共振器の発光部では、レーザ発振のために線幅は $1.5\ \text{\AA}$ （測定分解能）と狭帯域化されているのに対し、二重共振器の受光部では $50\ \text{mA}$ までの電流注入域ではレーザ発振せず、発光波長が光吸収電流スペクトルとほぼ同じく $60\ \text{\AA}$ の帯域に制限された LED モードの発光であることがわかる（受光スペクトルのところで議論した様に高次横モードの影響により短波長側に $10\ \text{\AA}$ 程度広帯域化している）。

図 3.25はパルス幅 50 ns のパルス光照射時のスイッチングエネルギースペクトルを示したものである。測定ばらつきが大きく確かなことは言えないが、単一共振器を使用した従来の VSTEP ではスイッチングエネルギーが 22 pJ であったのに対し、二重共振器では 100 程度にまで低減されている。また、少なくとも 30 Å 以上の波長帯域にわたり 1 pJ 以下と良好な値を得ている。

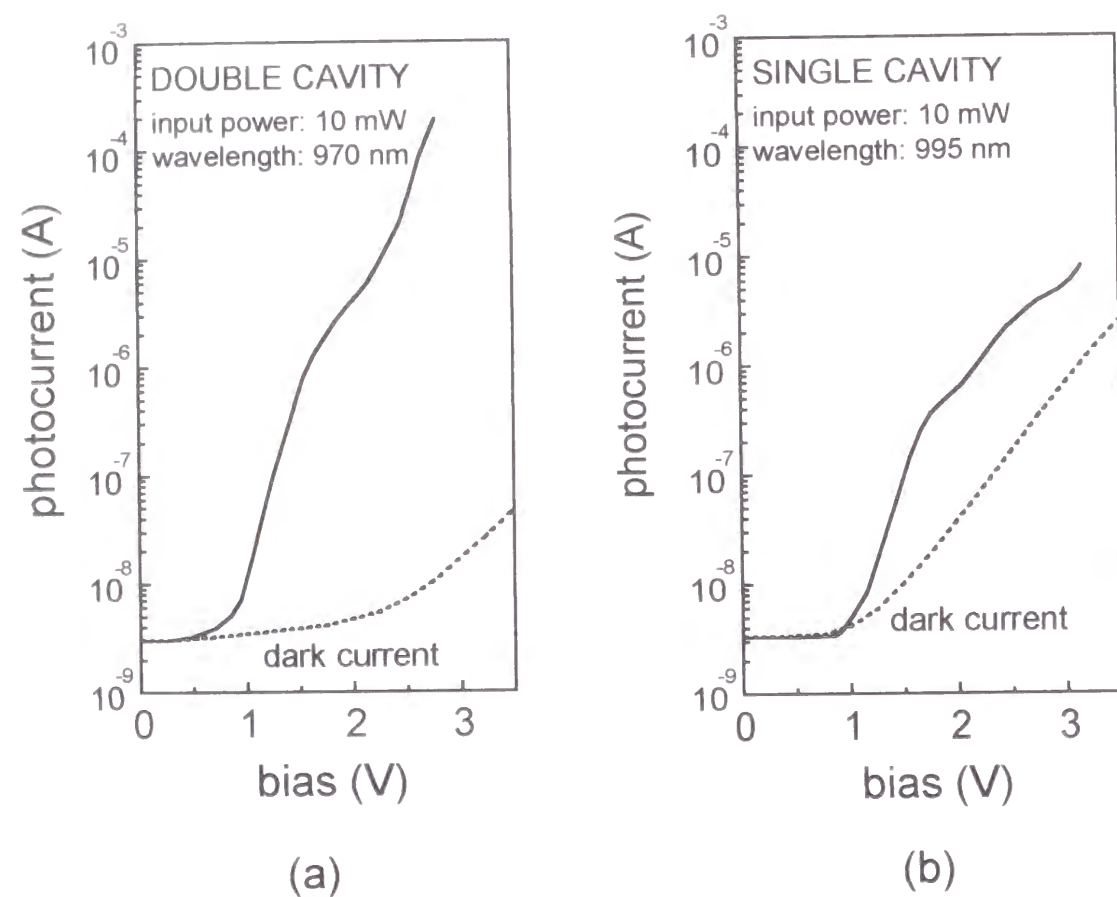


図 3.23 (a) DVC-PD 及び (b) VCSEL の光誘起電流の逆印加電圧依存性

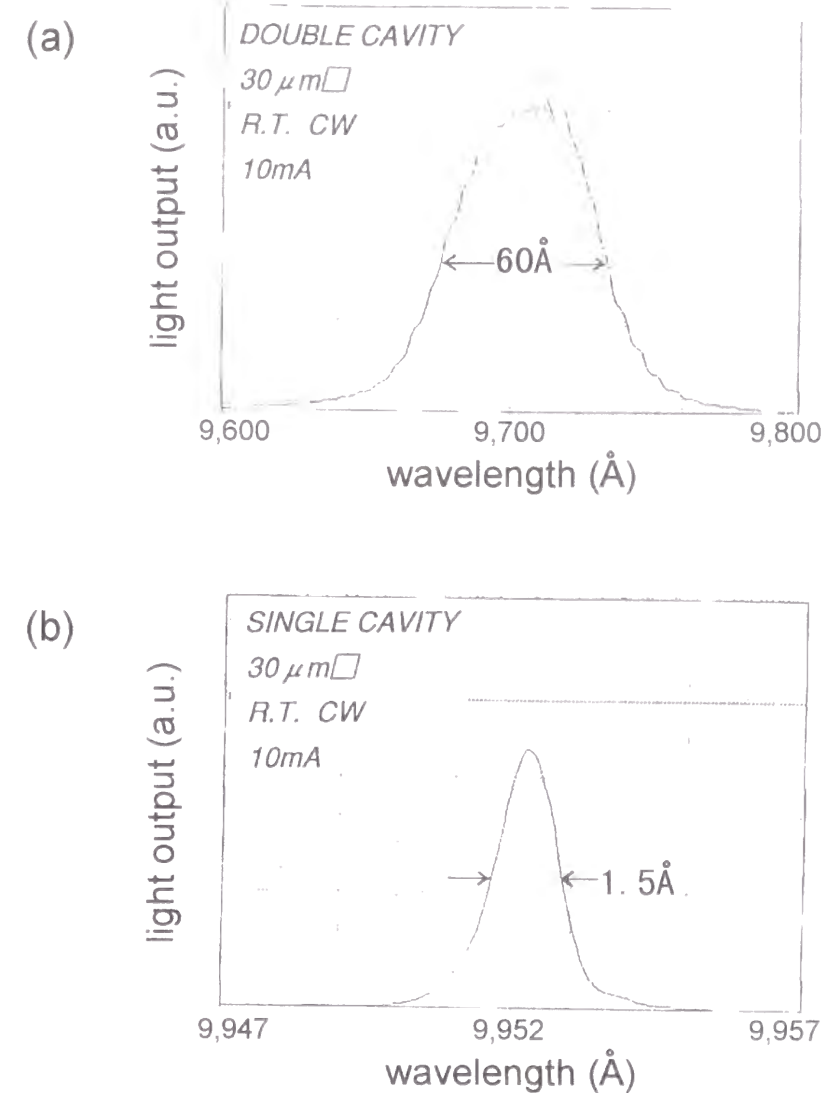


図 3.24 (a) DVC-PD 及び (b) VCSEL の発光スペクトル
いずれも電流注入条件は cw, 10 mA

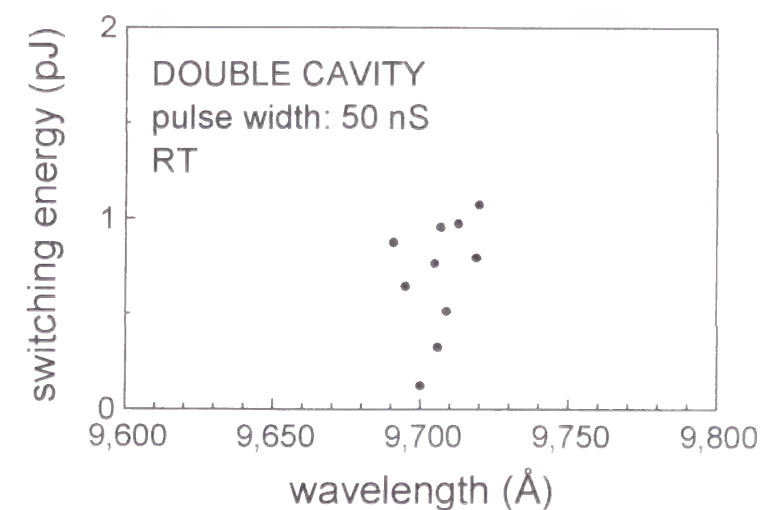


図 3.25 DVC-PD のスイッチングエネルギーの波長依存性

3.5 二重共振器型フォトトランジスタと VC-VSTEP との一体化構造

前節で発光素子と受光素子を分離し、個別に発光、受光機能を最適化することに成功した。しかしながら、VSTEP のもともと持っていたスイッチ、メモリ機能が欠落してしまった。そこで、もう一度 npnp 構造に立ち戻り、これらの機能を付加することを考える。本節では VC-VSTEP における npnp 中の npn 部を利用したやはり二重共振器型の異種接合フォトトランジスタ (double-vertical-cavity VSTEP, DVC-VSTEP) を提案し、実際に作製した素子でそのさらなる高感度、広帯域特性を実証する。さらに、この DVC-HPT は VC-VSTEP と整合性の良い層構造を持っていることから、これらをモノリシックに高密度集積化可能であることを実証する。さらに再成長を用いた独自のモノリシック一体化の方法について説明し、実際に作製した発受光分離一体化素子の特性を示す。これらの工夫により、光情報処理に必要な基本機能を独立に最適設計し良好な特性を得る事が可能となる。

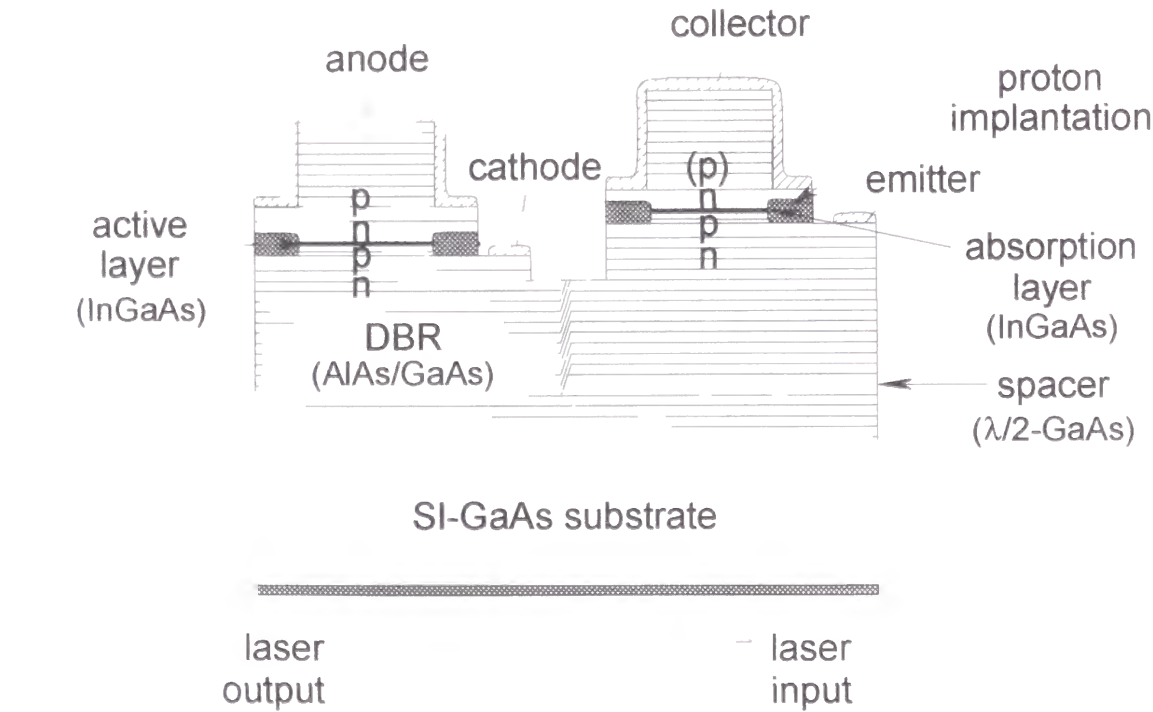


図 3.26 DVC-HPT、VC-VSTEP 一体化構造の概略図

3.5.1 素子構造と作製工程

素子構造を図 3.26 に示す。左側が単一共振器型 VSTEP (VC-VSTEP)、右側が二重共振器型フォトトランジスタ (DVC-HPT) である。それぞれの層構造は DVC-HPT 側で $\lambda/2$ 厚のスペーサ層を挟んであることを除いては全く同じ構造をしている。npnp 構造は発光側ではサイリスタ機能を、受光側ではそのうち npn 部のみを用いてコンタクト、ベース、エミッタとしてフォトトランジスタ機能を持たせてある。

詳細構造を DVC-HPT 部を例にとり以下に説明する (図 3.27 参照)。まず GaAs 基板 (n 型) 上に n-GaAs バッファ層を形成し、この上に n-GaAs (膜厚 515.4 Å, ドーピング濃度 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) と n-AlAs (膜厚 649.4 Å, ドーピング濃度 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) の交代多層膜よりなる n 型の下部 DBR、n-GaAs スペーサ層 (膜厚 1210.8 Å, ドーピング濃度 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)、n-GaAs (膜厚 515.4 Å, ドーピング濃度 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) と n-AlAs (膜厚 649.4 Å, ドーピング濃度 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) の交代多層膜よりなる n 型の中間 DBR を形成する。さらにその上に陰極層となる n-Al_{0.25}Ga_{0.75}As (膜厚 1553.9 Å, ドーピング濃度 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)、チャージシート層となる p-Al_{0.25}Ga_{0.75}As (膜厚 50 Å, ドーピング濃度 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)、下部閉じ込め層となる Al_{0.25}Ga_{0.75}As (膜厚 1000 Å, 非ドーパ)、活性

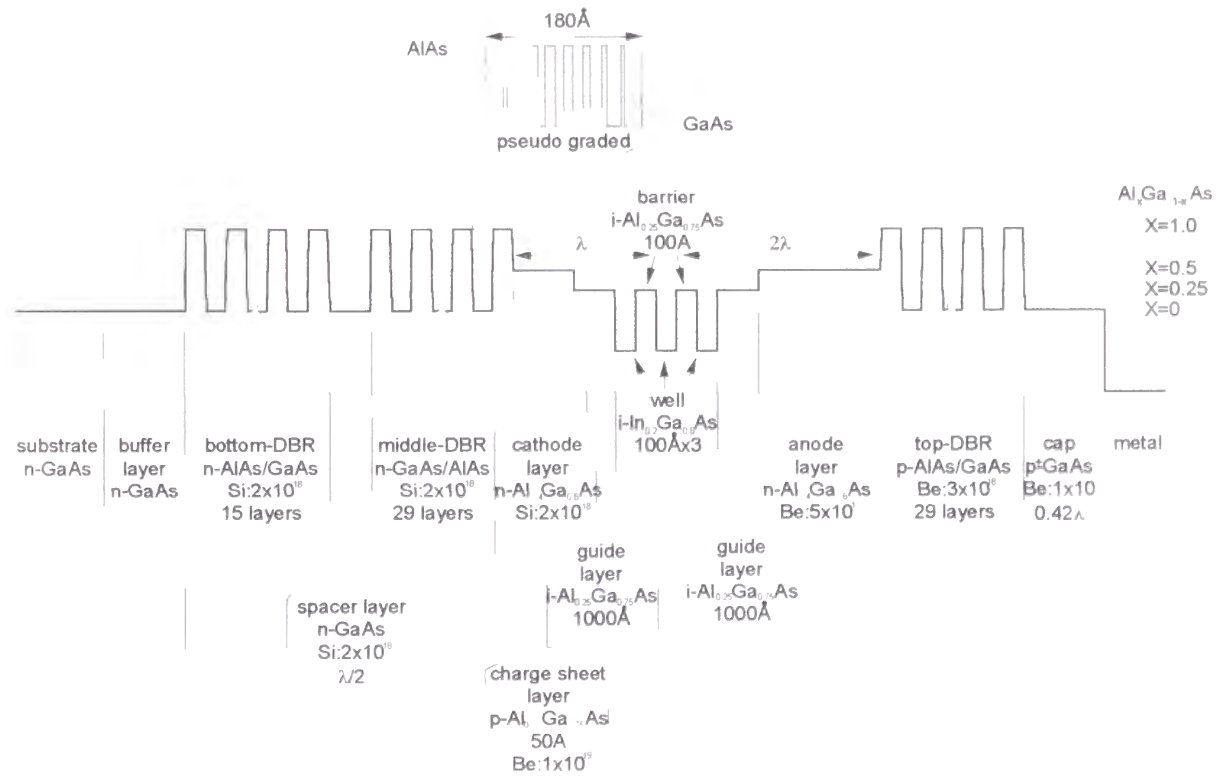


図 3.27 DVC-HPT 部のバンド構造

層兼吸収層となる $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ (膜厚 100 Å で 100 Å の非ドープ $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ を挟んで 3 層, 非ドープ)、上部閉じ込め層となる $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ (膜厚 900 Å, 非ドープ)、ゲート層となる $\text{n-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ (膜厚 1548.7 Å, ドーピング濃度 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) を形成する。さらに p-GaAs (膜厚 515.4 Å, ドーピング濃度 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) と p-AlAs (膜厚 633.7 Å, ドーピング濃度 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) の交代多層膜よりなる p 型の上層 DBR、 p-GaAs よりなる位相補正層 (膜厚 1050.4 Å, ドーピング濃度 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) を MBE 法で形成する。

次にこれら両構造のモノリシック集積化の工程を、図 3.28 を参照しながら以下に説明する。まず GaAs 基板上に 15 層の下層 DBR 及び $\lambda/2$ 厚の GaAs スペース層までを成長する。この上に n-AlAs (膜厚 649.4 Å, ドーピング濃度 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)、 n-GaAs (膜

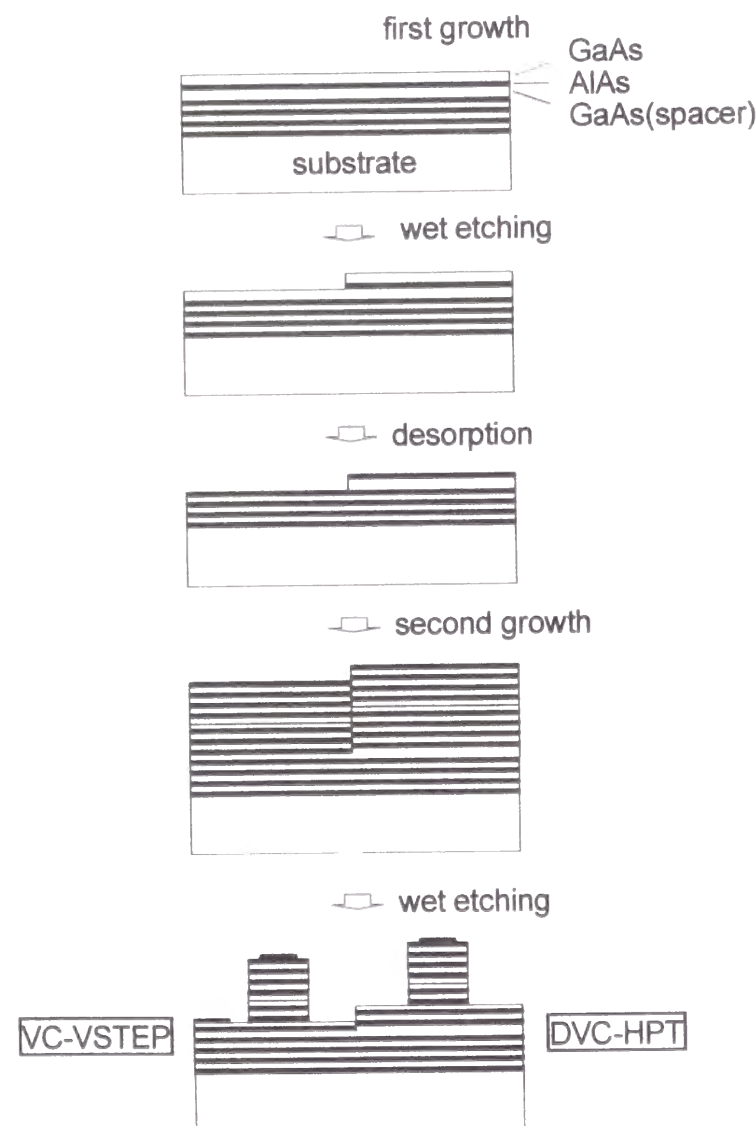


図 3.28 一体化 VSTEP の作製工程

厚数 100 Å, ドーピング濃度 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) を形成する。その後、受光部にのみレジストを塗布して保護し、発光部の最上の n-GaAs 層及び n-AlAs 層を選択エッチングで完全に除去し、さらに n-GaAs スペース層を半分程度軽くエッチングする。レジストを除去した後再び MBE チャンバー内に戻し、750°C に昇温して最上層に残した n-GaAs を発光部、受光部ともに除去して清浄な AlAs 表面を出す。その後中間 DBR 以降の層を受光部、発光部とも同時に再成長する。受光部、発光部はドライエッチングにより 6 μm 角のメサとするが、発光部は上部 p ドープ層上、受光部は上部 n ドープ層上までとする。素子の電氣的絶縁にはプロトン注入を用い高抵抗化する。電極として、発光部にはメサ上の陽極と基板側の陰極を、受光側にはメサ上部のコレクタと基板側のエミッタを蒸着法により作製する。

図 3.29 に本集積化素子の発光部、受光部、境界部の SEM 写真を示す。発光部、受光部の段差はわずか約 2000 Å、遷移領域は 3 μm 以下のため、受光部と発光部を 10 μm 程度まで近接させる高密度集積化が可能である。本試作では余裕を持たせて 125 μm 間隔とした。再成長したにも関わらず、膜質は良好で再成長を行わない通常のレーザと同等の 1.0 kA/cm^2 の発振閾密度を室温で得ている。

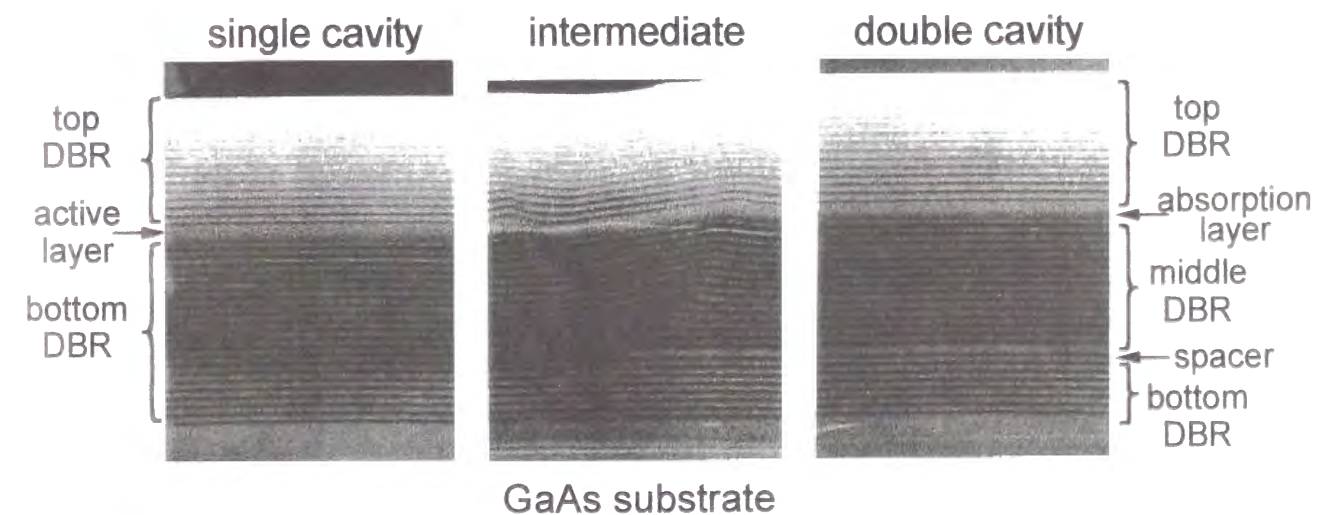


図 3.29 一体化 VSTEP の断面 SEM 写真

3.5.2 素子特性

VC-VSTEP 部の電流－光出力、電流－電圧特性を図 3.30 (a) に示す。室温パルス駆動 ($2\ \mu\text{s}$ 幅) 条件で発振閾値は $0.8\ \text{mA}$ でスロープ効率は $0.25\ \text{W/A}$ である。電力－光出力変換効率は $1\ \text{mW}$ の光出力下で 10% であった。また、電流－電圧特性からスイッチ電圧は $4.9\ \text{V}$ 、保持電圧は $1.8\ \text{V}$ である。cw 駆動下では発振閾値 $1.0\ \text{mA}$ 、電力－光出力変換効率 8.1% と若干特性が落ちる。

DVC-HPT 部の光電流－電圧特性を入力光強度の関数として図 3.30 (b) に示す。

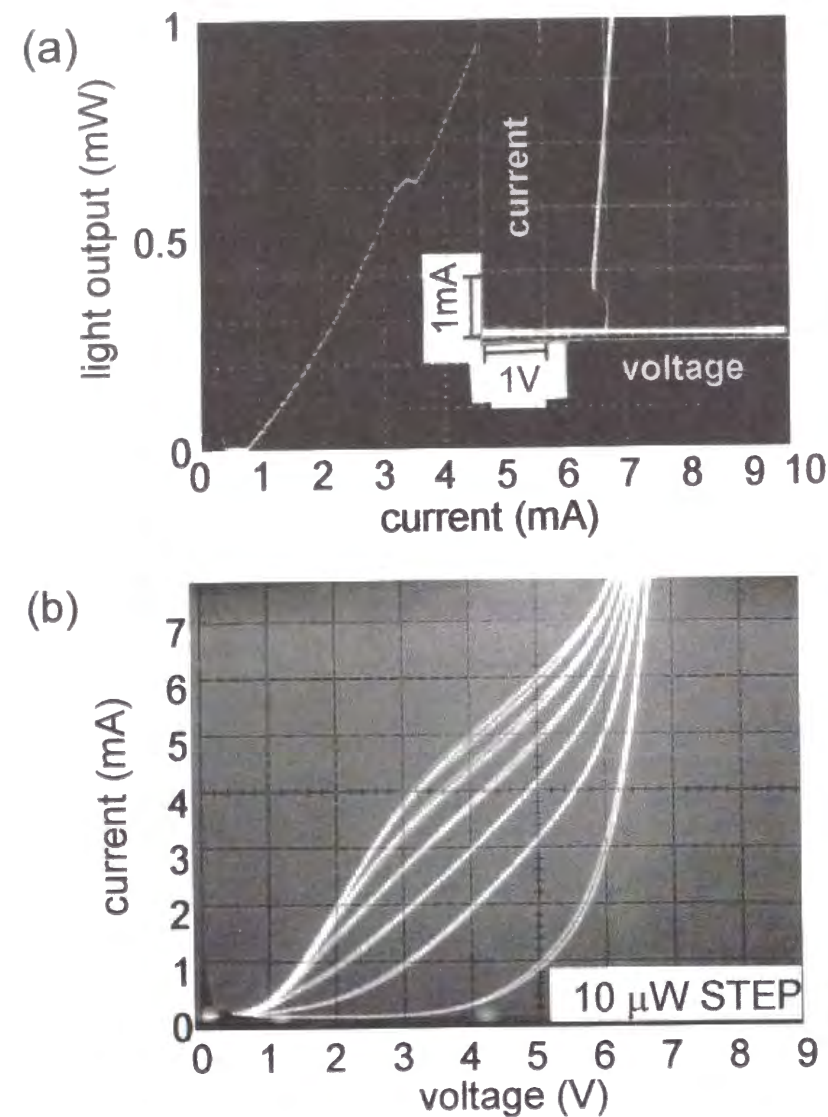


図 3.30 (a) VC-VSTEP の電流－光出力、電流－電圧特性
(b) DVC-VSTEP の光誘起電流－電圧特性

印加電圧 $5.7\ \text{V}$ 、入射光強度 $30\ \mu\text{W}$ において光電流は $2.1\ \text{mA}$ に達する。光結合効率を $-3\ \text{dB}$ 、最大吸収率を設計通りの 43% とすると、これは $70\ \text{A/W}$ の光電流利得、 412 倍のトランジスタ利得に対応する。

実際に測定した VC-VSTEP の発光スペクトルを対数目盛表示で図 3.31 (a) に、また DVC-HPT の光電流スペクトルを線形目盛表示で図 3.31 (b) に示す。発光部の線幅は $1.5\ \text{\AA}$ であるが、これは分光器の分解能で制限されている。受光部の光電流スペクトルから、設計通りの約 $50\ \text{\AA}$ のバンド幅を得ていることがわかる。このバンド幅はレーザ波長の温度係数を $0.63\ \text{\AA}/^\circ\text{C}$ とすると約 80°C の電流加熱に対応する耐性を確保するものである。図 3.31 (b) 中の破線は再成長前後での成長膜厚が共振波長にして $7\ \text{\AA}$ だけずれたとして計算した光電流スペクトルで、実験点を良く再現している。今回、素子間隔を $125\ \mu\text{m}$ と多少大きめに設定したが、それでも発光部と受光部のス

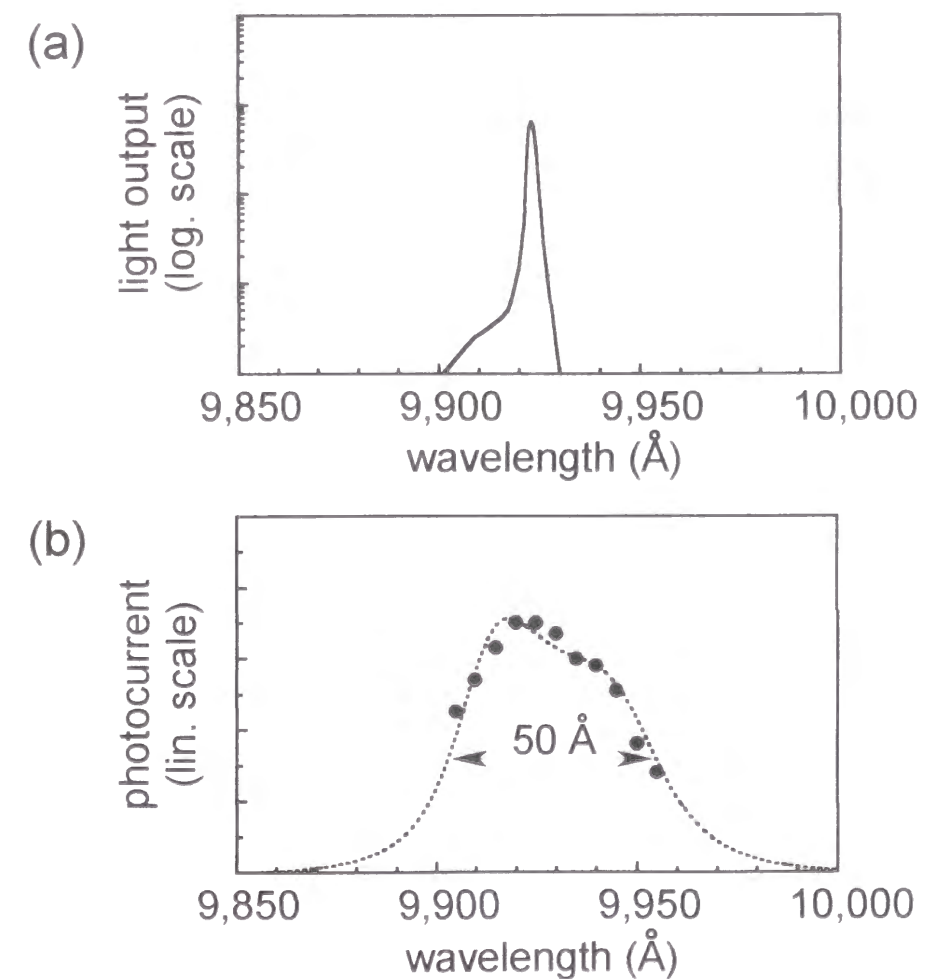


図 3.31 (a) VC-VSTEP の発光スペクトル及び
(b) DVC-HPT の光電流スペクトル

ベクトルピークはほぼ一致しており、双方共に多段接続された超並列機能性光接続を構成するのに十分な特性を備えている。

上述の様に、発光部と受光部はほぼ同一の構造であるとは言え、再成長過程を伴うため、一回目と二回目の成長膜厚が微妙に異なる可能性がある。この膜厚の相違が光電流スペクトルの歪みを引き起こす。図 3.32 は一回目の共振波長 (λ_1) を基準として

二回目の共振波長 (λ_2) が $\Delta\lambda$ だけずれたことによる光電流スペクトルの歪みを計算機解析したものである。 $\Delta\lambda$ が増加するにつれ、スペクトルは長波長側に歪んでいくが、 $\Delta\lambda$ が 30 Å までは設計帯域の 50 Å を得ることができる。この波長合わせに必要な制御性は約 0.3% であり、現状の再成長技術で十分対応可能である。

図 3.33 には発光部及び受光部の小信号変調特性を示す。発光部では発光強度の変調が、受光部では光電流利得の変調を見ている。発光部のレーザサイリスタは 1.2 GHz の遮断周波数を持っている。これに対して受光部のフォトサイリスタは、3 A/W の光電流が 1.0 GHz の周波数で得られる。遮断周波数で比較すると受光部は 70 MHz となり発光部に対して 1 桁以上劣っていることになるが、これは受光面積を発光部より意図的に 1 桁以上大きくとっているためで、面積が等しければ発光部と同等のと特性が得られるものと思われる。

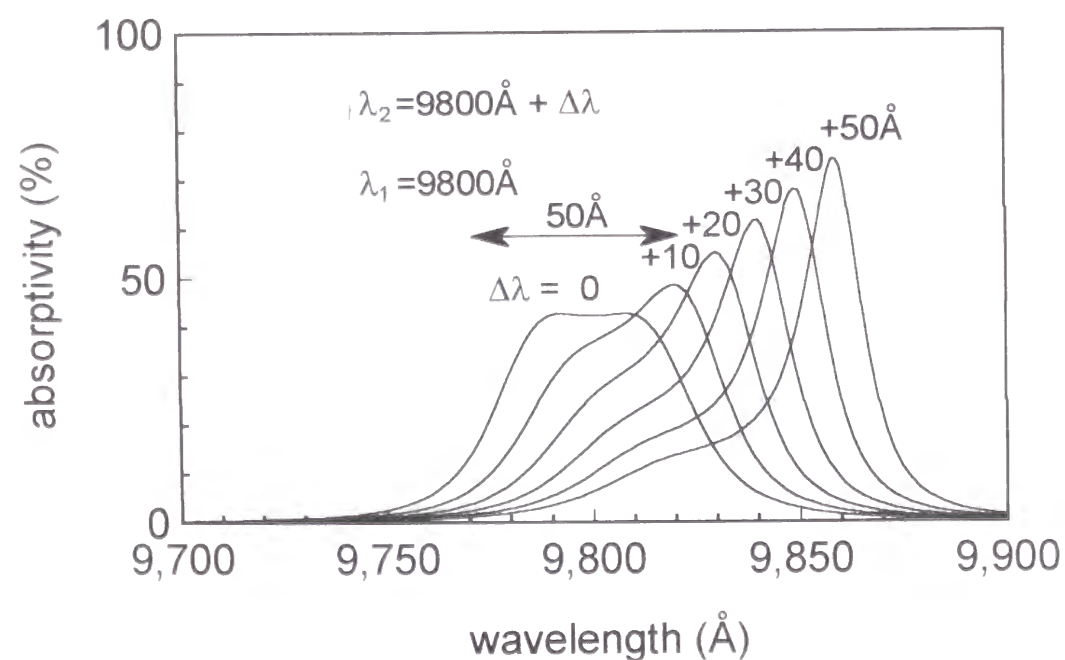


図 3.32 DVC-HPT の吸収スペクトルの成長膜厚ずれ依存性

最後にこのレーザサイリスタとフォトランジスタを接続して構成される光増幅機能付き VSTEP 動作について説明する。図 3.34 はこの基本構造を示したもので、レーザサイリスタとフォトランジスタは直列接続されている。この構造で得られる I-V 特性を図 3.35 に示す。破線は発光部であるレーザサイリスタの I-V 曲線を、実線は受光部であるフォトランジスタの I-V 曲線を印加電圧の 7 V を原点として表示してあり、これら 2 曲線の接点が直列接続時の動作点を示す。印加電圧 7 V を印加したオン状態でフォトランジスタに 10 μW の光信号が入力すると、初期状態①から発振状態②に遷移する。その後光信号が low 状態 (〜0) となると動作点は発振閾値付近の状態③となり、570 μW のレーザ光を出射する。以後光信号の強弱に伴い状態②と③を繰り返す。印加電圧を 3 V 以下に一度降下させることにより、動作点は状態①に戻り、入射光には反応しないオフ状態となる。従ってこの時の光増幅率は 57 倍となる。これにより、発光、受光はもとより、スイッチ動作、メモリ動作に合わせて光増幅動作をこの様な単純な組み合わせで実現できる。

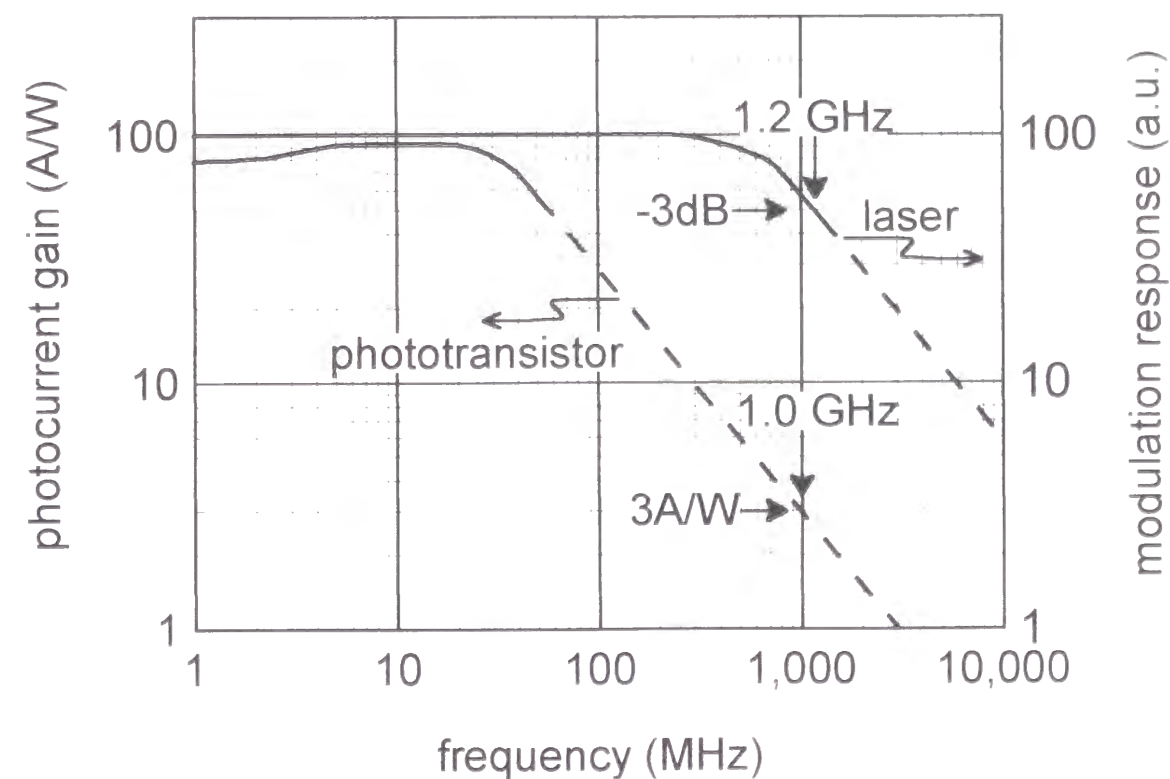


図 3.33 DVC-PD 及び VCSEL の小信号変調特性

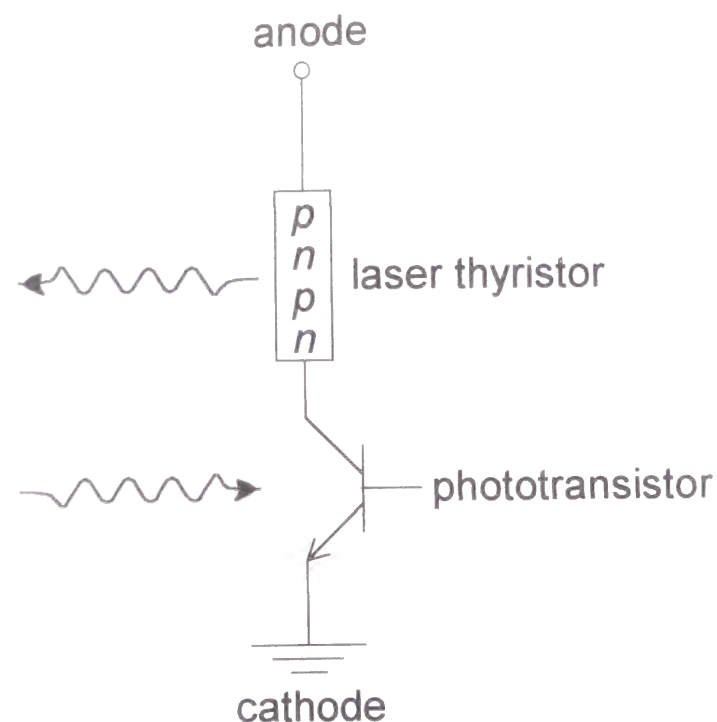


図 3.34 DVC-PD 及び VCSEL の接続例（直列接続）

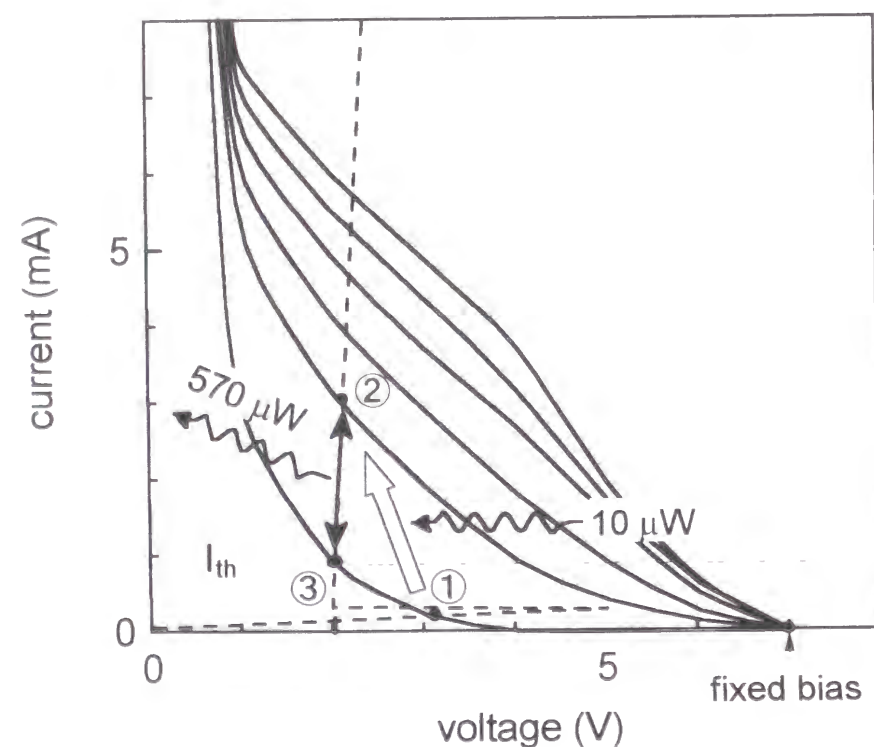


図 3.35 図 3.34 に示した直列接続時の動作特性を示す電流－電圧関係図

3.6 面発光機能素子の機能性光接続応用

本研究で開発した面発光機能素子を用いれば、面発光レーザを単なる光接続発光素子としてだけではなく、様々な機能を持った機能性光接続素子とすることができ、この機能の一つとして、データの行き先を自己選択するセルフルーティンクスイッチがある^{58・59}。図 3.36 にデータの入出力が光信号で構成された光セルフルーティンクスイッチの概念図を示す。ここでは簡単のために 3 入力、3 出力としてあるが、 $N \times N$ 個の面発光機能素子を配列することにより、 N 入力、 N 出力のセルフルーティンクスイッチが可能となる。以下、本構成の機能を簡単に説明する。光入力信号の先頭に、データの行き先を決めるためのヘッダと、これに続くデータが含まれている。これらの光入力信号は図のように水平に展開され、マトリックス状に配列された面発光機能素子の各行に入力される。この面発光機能素子にはバイアス信号が電氣的に印加されるが、これはトリガーハルスに引き続いて一定のバイアス電圧が印加される単純な信号である。トリガーハルスは光入力信号のヘッダに同期し、面発光機能素子の列毎に 1 周期ずつタイミングをずらしてある。したがって、光入力信号のうちヘッダのタイミングがトリガーハルスと一致したもののみ、面発光機能素子がスイッチオンの状態となり、後続のデータを受光、増幅し発光することが可能となる。この発光信号は出力側で、列毎に束ねられて光出力信号となる。これらの一連の動作により、光データ信号が

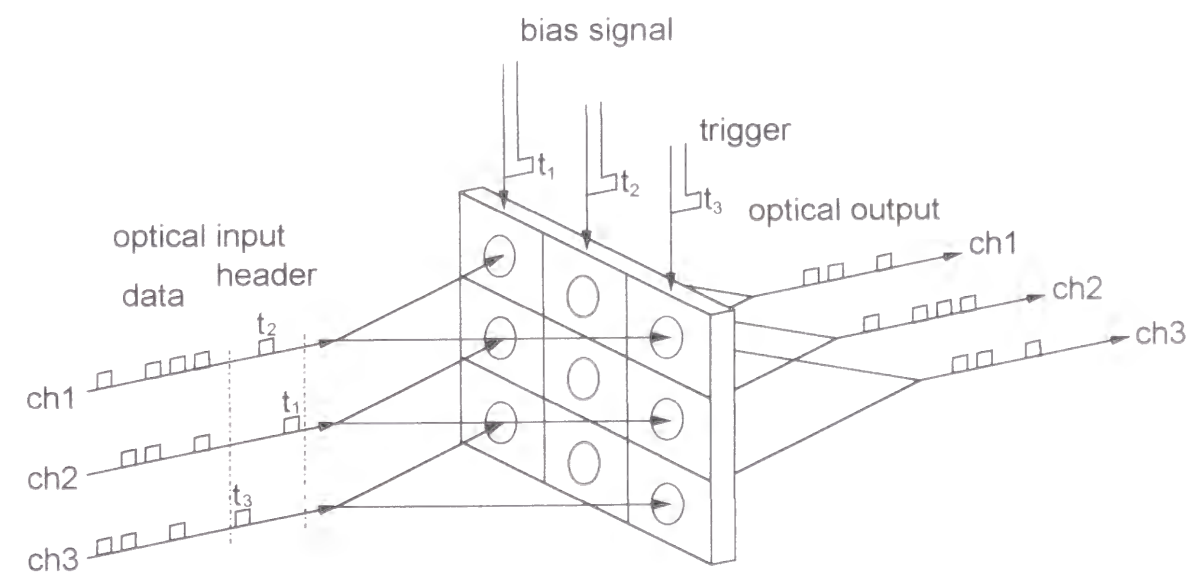


図 3.36 面発光機能素子を用いた光セルフルーティンクスイッチの構成概念図

已選択的に情報の行き先を決めて光接続される光セルフルーティングが可能となる
トリガーハルスによりスイッチオンする動作に面発光機能素子のスイッチ、メモリ機能
能を利用し、その後のデータの流れに受光、増幅、発光機能を利用するわけである

3.7 まとめ

本章では、VCSEL の光情報処理要素素子としての側面に目を向け、そのために必要不可欠な要素機能である発光、受光、スイッチ、メモリ、増幅の5機能を付加したスマートピクセルの提案と実証を行った。この中で、共振器構造の多重化によるスペクトル形状の制御法を見出し、逆電圧印加による禁制帯制御などとの複合効果で、モリシック集積の利点を損なわず個々の機能を最適化することを可能とした。実際に試作した VCSEL スマートピクセルを評価し、スイッチ、メモリ機能の確認とともに、実用上十分な 50 \AA 以上の受光帯域と 57 倍の光増幅率を得た。本素子構造により、多層膜設計の自由度が上がり、波長多重通信への応用で必要となる波長選択性を持たせることも可能である。

第4章 面発光レーザの並列データ伝送への応用

4.1 まえがき

本章では面発光レーザの重要な応用の一つである光データ伝送応用について述べる。面発光レーザの特徴は単体レーザとしての良好な特性にとどまらず、二次元面内配列とその稠密配置の可能性にある。しかしながら、この重要な特徴を積極的に生かした例はこれまでになかった。本研究ではこの二次元性を生かしながらも、光ファイバとの一括自導位置合わせ（セルフアライン）が可能な構造を初めて考案し、プラスチック整形技術との融合でさらに実用性を高めた。また、この二次元集積性を極限まで追求した例としてイメージファイバによる二次元一括並列伝送を考案し、将来の超高密度並列光信号伝送の基礎的可能性を実証した。さらに、面発光レーザの一般家庭への普及を目指した大口径プラスチッククラッドファイバによる簡易伝送システムについても、先駆的な研究を行った。

4.2 2次元 VCSEL アレイ並列伝送モジュール

並列光伝送は面発光レーザの早期実用化の市場として最も有望視されている。実際に短距離データ伝送への応用例として既にいくつかの VCSEL モジュールが北米を中心に発表されている（表 1.1 参照）。しかしながら、これらはいずれも光導波路⁸⁶ ⁸⁹や 45 研磨短尺ファイバ⁹⁰ などの中間部品を VCSEL とヒゲテールファイバ⁹¹ の間に介し、VCSEL を光らせながら、あるいはカメラでモニタしながら相互に位置合わせする構造を採っている。このため実装工程が複雑となり、VCSEL の面実装性の利点を十分に生かしていない。また VCSEL を使いながらも一次元アレイに限定された構造になっており、VCSEL の二次元アレイとしての特徴も生かされていないのが現状である。

このような VCSEL の特徴を最大限に生かす構造として、一次元 (1D) に留まらず二次元 (2D) アレイ状のファイバ一括挿抜型 VCSEL 光送信モジュール (2D-VCSEL モジュール) を初めて実現した⁹¹。コンポーネント化による量産効果が期待できる多芯ファイバコネクタとの一括挿抜構造の採用、量産化が可能なプラスチック射出成型による高精度パッケージの採用により極端な低コスト化を図った。また、実装についてもチップ実装からパッケージ実装に至るまで能動的なあるいは画像認識による

調芯を全く必要としない自導位置合わせ実装方法を工夫し、貫した専用実装機を作製し、多芯ファイバコネクタへの十分な光結合特性と伝送特性を得た。

VCSEL を用いた並列光接続モジュールの代表的なものの構造を図 4.1 に比較する（表 11 参照）。（a）の OETC は IBM を中心とするコンソーシアムの名称、（b）の POLO は HP を中心とする共同開発組織名、（c）の OptoBus は Motorola の商品名である。OETC、POLO はファイバあるいはポリマー導波路を斜め研磨して VCSEL 光をファイバに導く方法をとっており、OptoBus はポリマー導波路の背面に VCSEL を貼り付ける方法をとっている。これらはいずれも短尺ファイバあるいはポリマー導波路という中間光学部品を必要とする点で共通している。これに対し本モジュールでは次節で示す様な直接結合構成をとっており、不要な部品を必要としない利点を持つ。

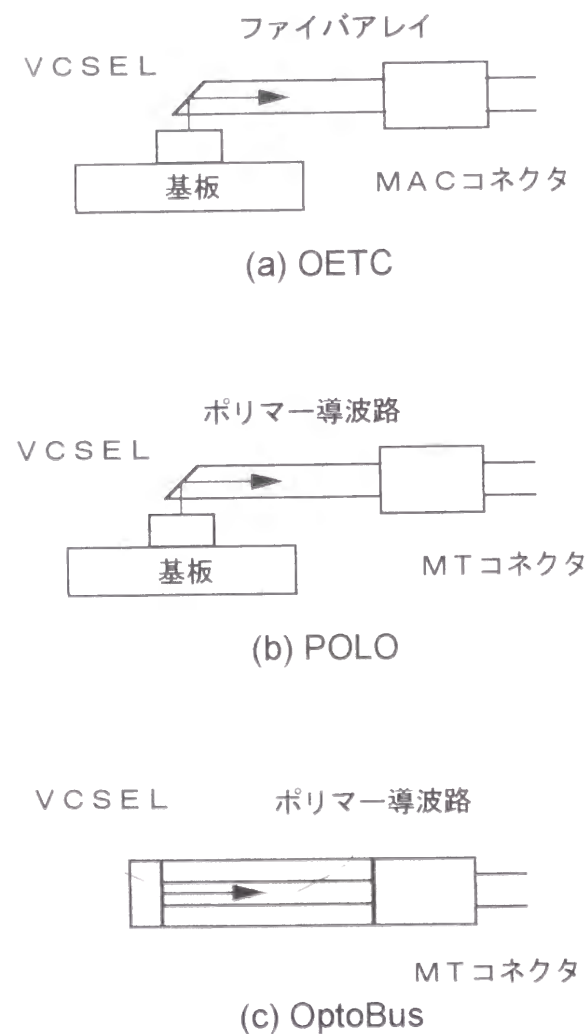


図 4.1 VCSEL を用いた並列光接続モジュールの主要構造比較

4.2.1 モジュール構造

本モジュールは図 4.2 に構造概略を示すように、VCSEL パッケージ、ファイバコネクタ、アダプタから構成されている。パッケージは多芯ファイバコネクタに一括挿抜可能なレセプタクル構造となっている。これにより、ピグテール、導波路、短尺ファイバ等の介在部品を用いることなく、ファイバとの直接接続が可能となり、モジュールのコンポーネント化と量産効果による低コスト化が期待出来る。また、パッケージ材料には高性能エンブラ（液晶ポリマー、LCP）を用い、射出成型により作製し、量産化との整合性を確保した。さらに、このパッケージ上に立体的な成型メッキ配線回路（molded interconnect device, MID 法）を形成し、配線基板を一体化することにより部品点数を削減した。その他、アレイ駆動に必要な放熱性を確保するため、パッケージの配線以外の部分にも厚膜メッキを施し、表面からの熱伝導を向上する等の工夫を施している。

図 4.3 に本モジュールの概観写真を示す。パッケージの寸法は $25 \times 10 \times 4$ mm である。

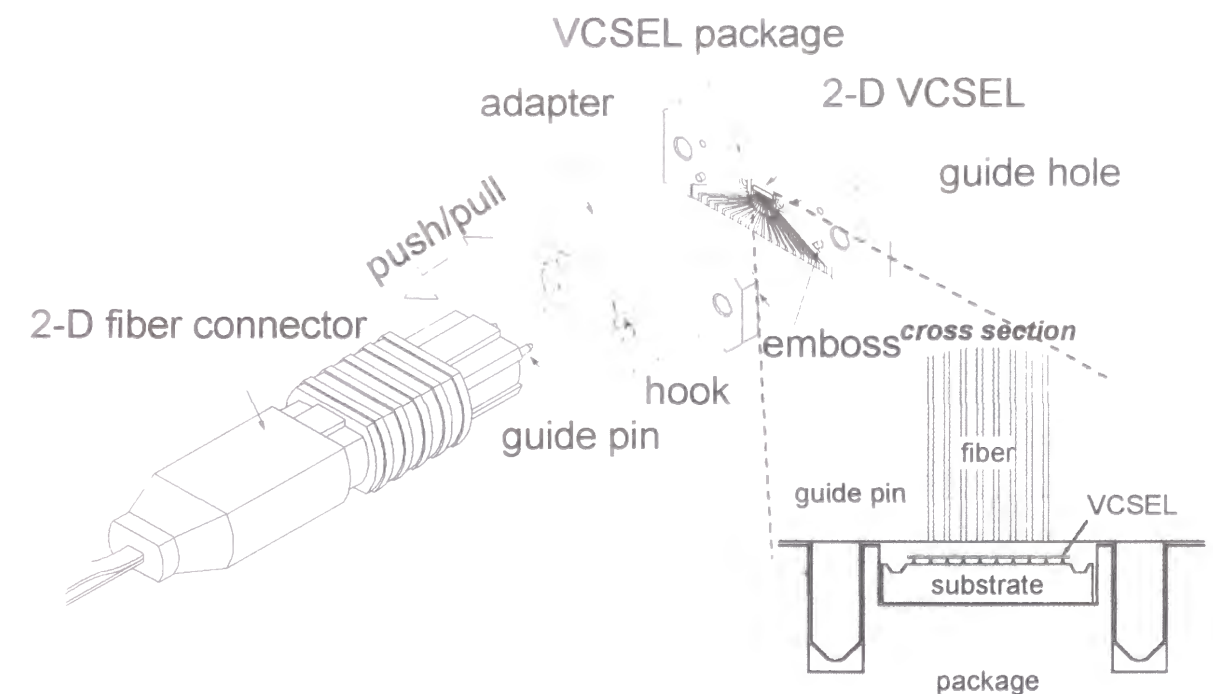


図 4.2 2D-VCSEL モジュールの概略構造図

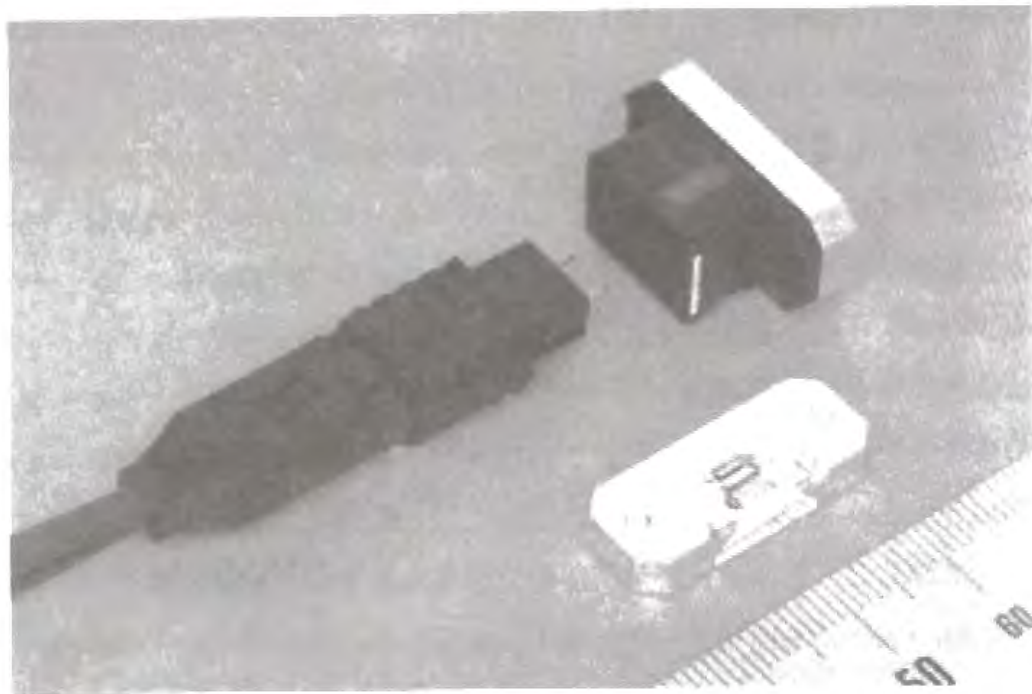


図 4.3 2D-VCSEL モジュールの外観写真

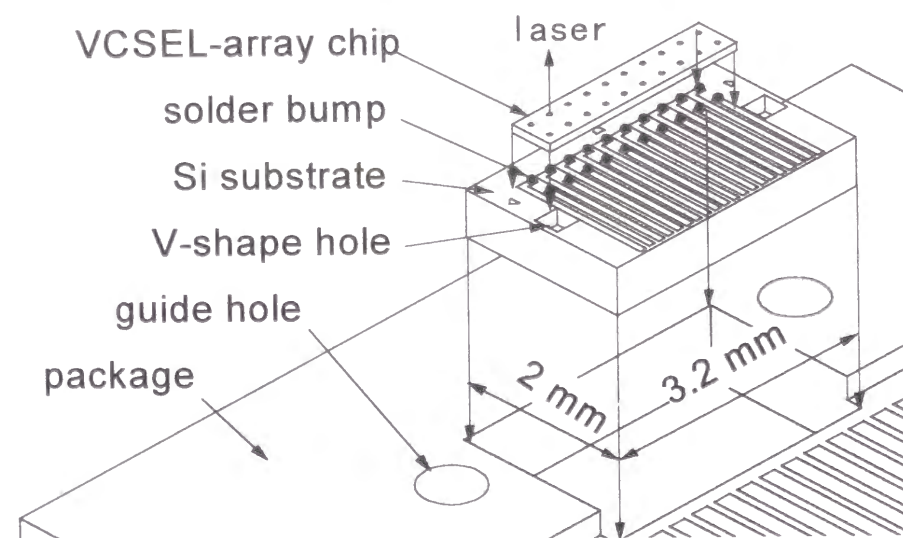


図 4.4 2D-VCSEL モジュールの実装構造概略

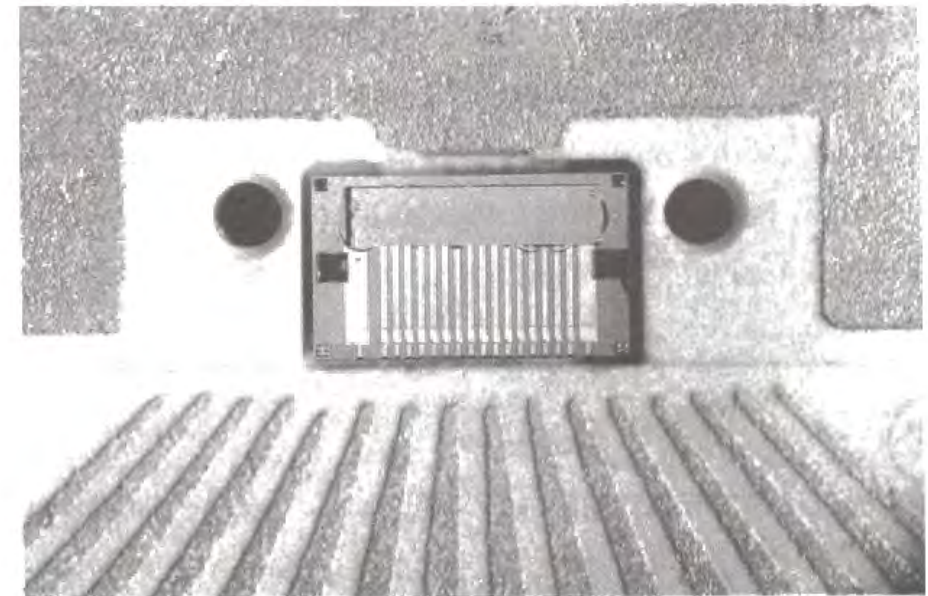


図 4.5 2D-VCSEL 搭載パッケージの拡大写真

VCSEL パッケージは図 4.4 に示す様に VCSEL アレイチップ、Si 基板、パッケージより構成されている。Si 基板には配線上にメッキ形成された 20 個の半田バンプと位置合わせのための V 字孔が 2 箇所形成されている。

図 4.5 はパッケージに実装された VCSEL 搭載 Si 基板の写真で、Si 基板の寸法は $3.2 \times 2 \times 0.625$ である。

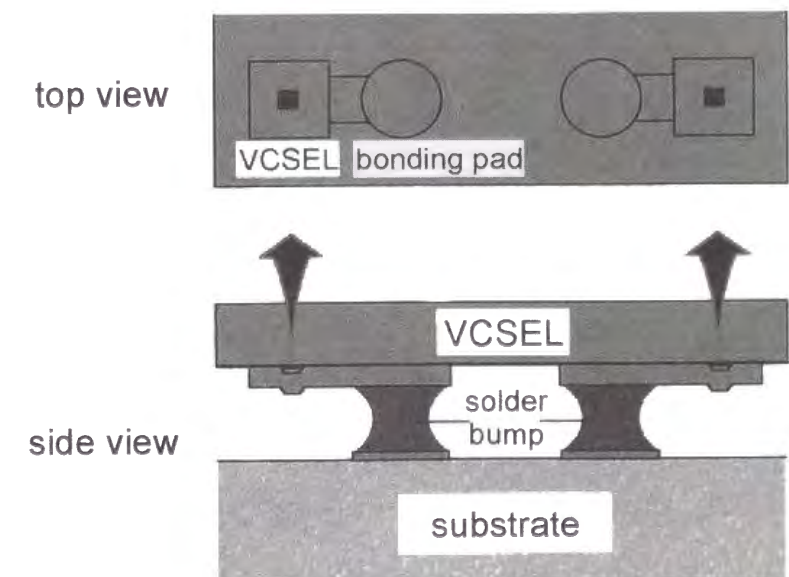


図 4.6 パッドシフト構造概略説明図

ここで用いた VCSEL は 8×2 アレイ構造で、水平方向の間隔は $250 \mu\text{m}$ と 1 次元ファイバアレイで標準の MT (mechanical transferable) コネクタと同一間隔としてある。垂直方向は $500 \mu\text{m}$ と広めに設定してある。ボンディング時に半田や基板との膨張係数差により生じるストレスを軽減するため、図 4.6 に示す様にボンディングパッドは VCSEL 位置から $125 \mu\text{m}$ だけ離してある。チップ寸法は $0.5 \times 2.5 \times 0.1 \text{ mm}$ である。

4.2.2 実装工程

LD チップの基板への実装には通常、LD を光らせての能動的な位置合わせや画像認識を用いた位置合わせを行うが、本モジュールでは VCSEL チップの Si 基板への実装にはフリップチップ実装を、Si 基板のパッケージへの実装には Si 基板上に形成された V 字孔及びパッケージ側のガイドピン孔を利用した独自のボールガイド実装により、全工程での自導位置合わせ実装を可能とした。

まず、VCSEL の Si 基板への実装には半田バンプによる自導位置合わせフリップチップボンディング実装法を用いている。これは図 4.7 に示す様に、半田の表面張力に起因する復元力を利用したものであり、Si 基板上の所望位置に自導的に引き寄せられる。

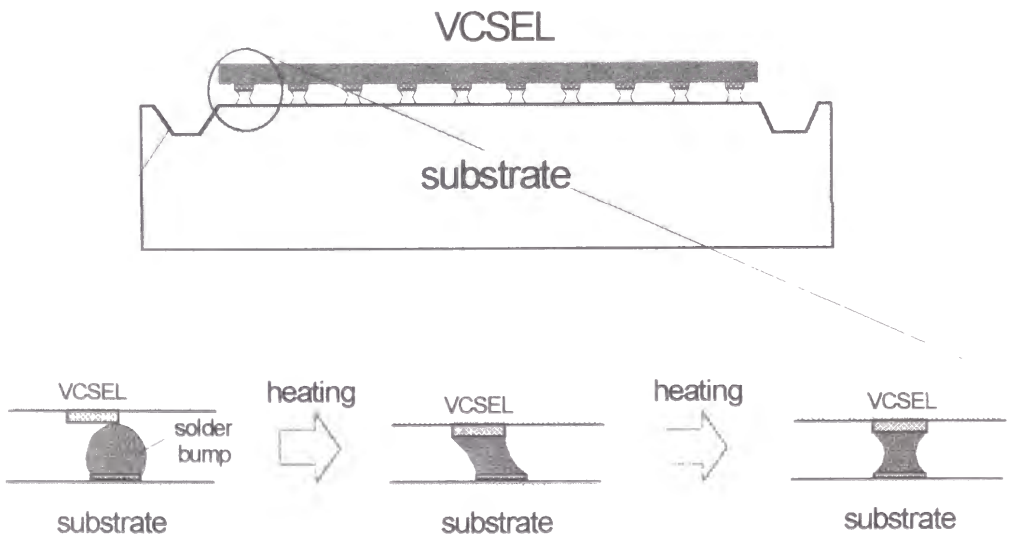


図 4.7 VCSEL チップの Si 基板へのフリップチップ実装

また、この VCSEL 搭載 Si 基板のパッケージへの実装は工程図 4.8 に示す様に、ファイバコネクタ用のガイドピン穴を利用してやはり自導位置合わせ実装を可能としている。Si 基板はまず位置合わせヘッドに吸着保持され (a)、位置合わせヘッド上の二つの位置合わせバンプが Si 基板の V 字孔にかみ合う (b)。その後、位置合わせヘッドのガイドピンがパッケージのピン穴に挿入する様に Si 基板をパッケージ上に降ろし (c)、あらかじめ塗布しておいた半田によりパッケージに融着固定する (d)。

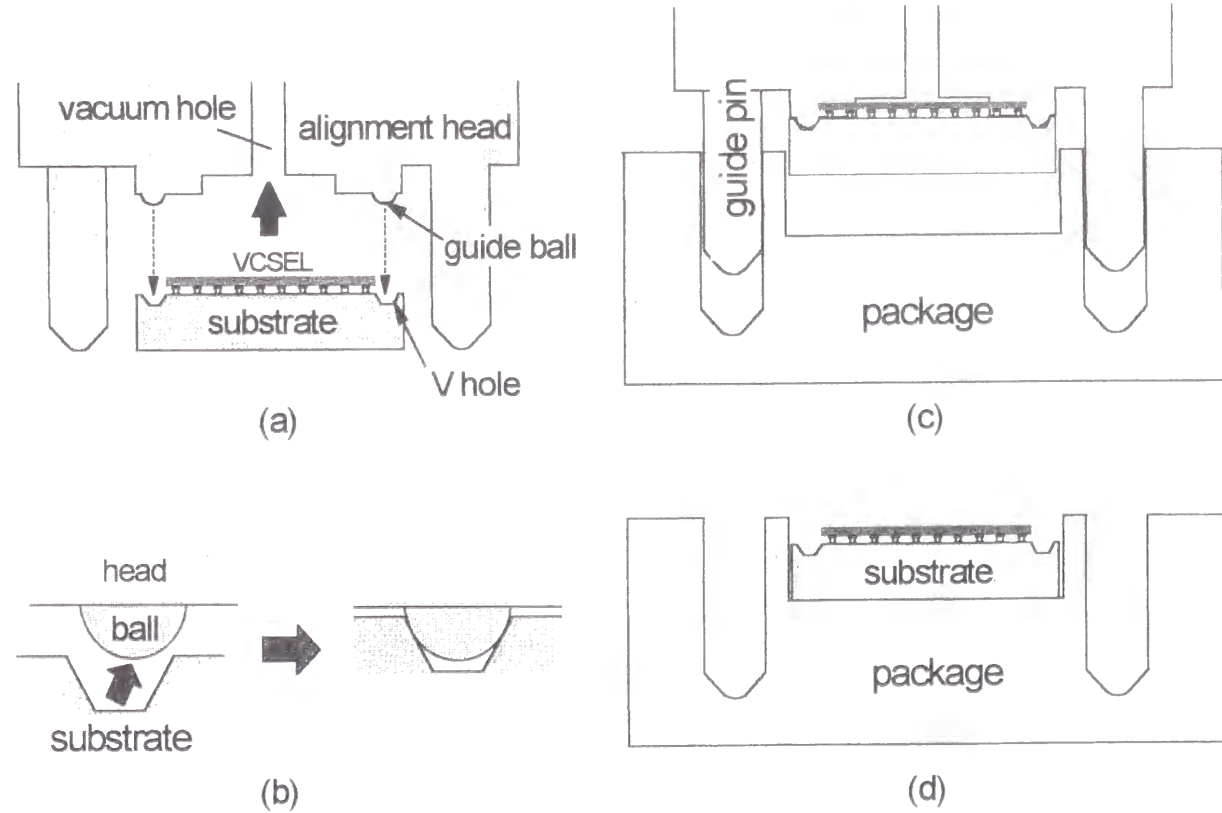


図 4.8 VCSEL 搭載 Si 基板のパッケージへのボールガイド実装

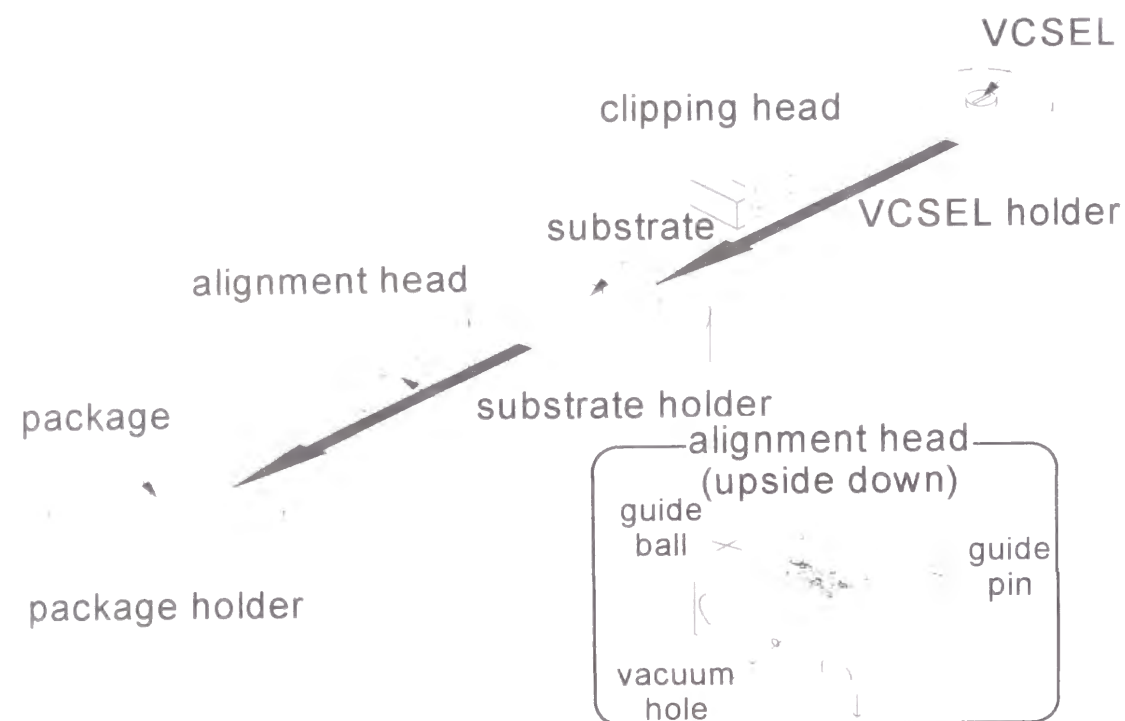


図 4.9 実装機のパッケージ実装部及び位置合わせヘッドの詳細構造

本実装のために開発した実装機のパッケージ実装部概略と位置合わせヘッドのチップ吸着面の詳細構造を図 4.9 に示す。位置合わせヘッド上の位置合わせバンプは直径 300 μm のボールベアリングを固定し、ガイドピンには MT ファイバコネクタに実際に使用されているものを用いている

VCSEL チップ実装からパッケージ実装まで一貫した自導位置合わせ実装を可能とした一貫実装機の全体写真を図 4.10 に示す。大きく分けて、実装部、制御部、モニタ部より構成されている。実装部はチップ、基板、パッケージそれぞれに対応したホルダとチップ実装、パッケージ実装に対応したヘッドにより構成されており、制御部は温度、圧力、ガス流量を制御している。自導位置合わせを用いているため、実装部の精度は数 10 μm で十分である。また、モニタ部は最初の大まかな位置合わせ確認に使用する。

2次元ファイバアレイ（2D-ファイバ）コネクタの作製には、最初図 4.11 に示した様に片面に V 溝加工した 2 枚の Si 基板を V 溝側で張り合わせ、この間に同じく Si 製のスペーサを挟んで 2 対のファイバアレイを配列する方式をまずは採用した。その後コスト性と歩留まりを考え、図 4.12 に示す様なプラスチック成形とした^[92]。この方法を説明すると、マスタとして図 4.12 とほぼ同様の構造を持つ Si ベンチを作り、反対側を保持するためのスペーサと外形を決めるための上下の金型を用い、ファイバ固定用のフェルールをプラスチック成形するものである。このフェルールの寸法は 1 次元アレイで標準となっている MT コネクタと同一とし、ファイバ配列のみ 2 次元とした。これにより、アダプタ、ハウジング等も標準的なものが利用できるようになった。

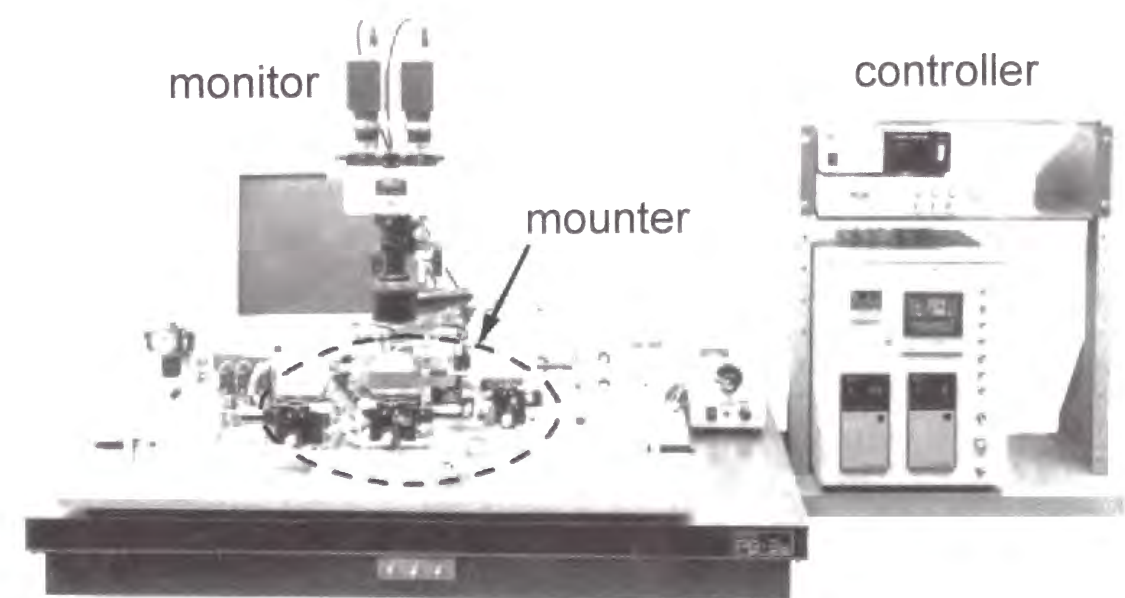


図 4.10 2D-VCSEL モジュールのチップ実装からパッケージ実装までの一貫自導位置合わせ実装機の写真

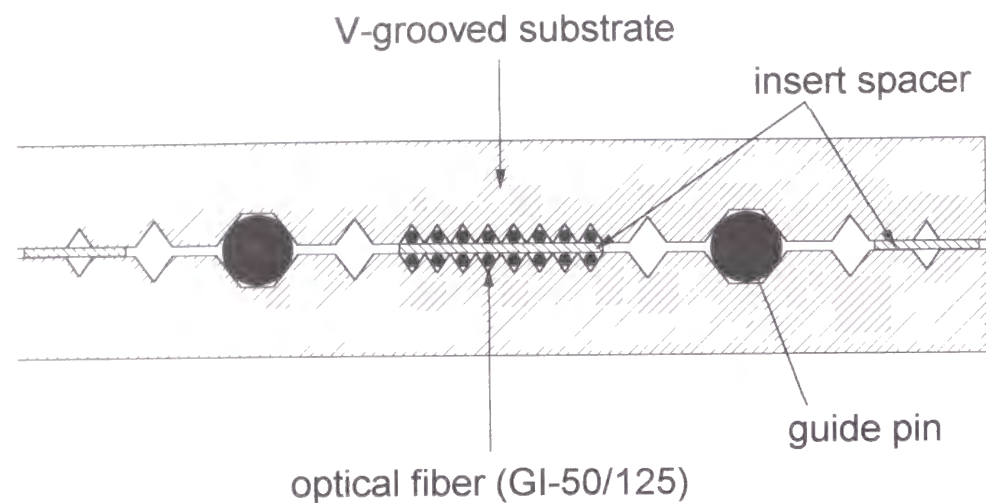


図 4.11 V溝 Si を用いた 2 次元ファイバ実装

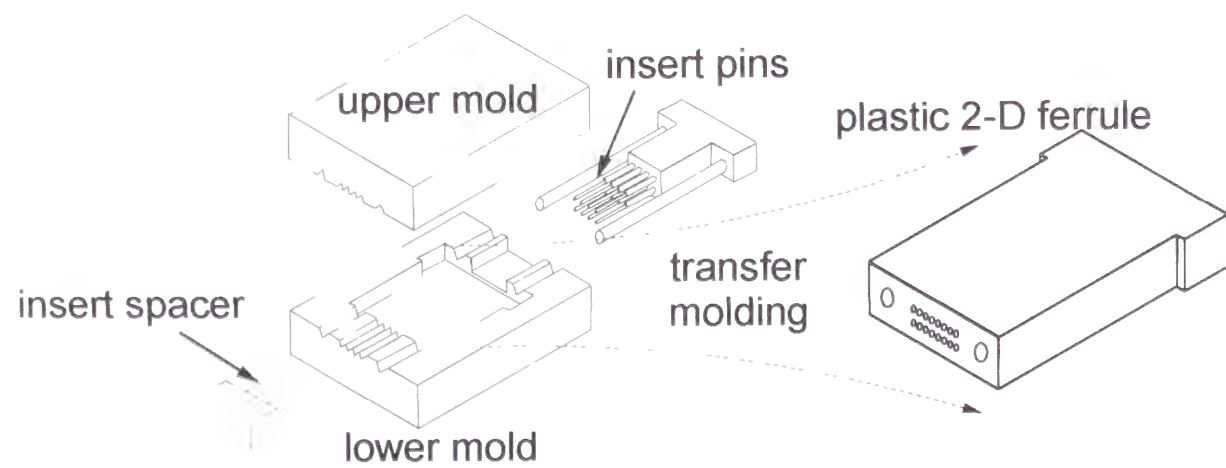


図 4.12 プラスチック成形を用いた 2D-ファイバ実装

4.2.3 モジュール特性

(1) VCSEL 及びファイバの実装精度

一般に短距離データ伝送に要求される光結合損失は 3 dB 程度である。これに必要な実装精度を見積もるためにまずファイバ (multimode fiber, MMF 50/125) への光結合損失の VCSEL 位置ずれ量依存性を測定した結果を図 4.13 に示す。これより、3 dB の損失確保に必要なずれ量は横方向で 22 μm 、縦方向で 140 μm 以下であることがわ

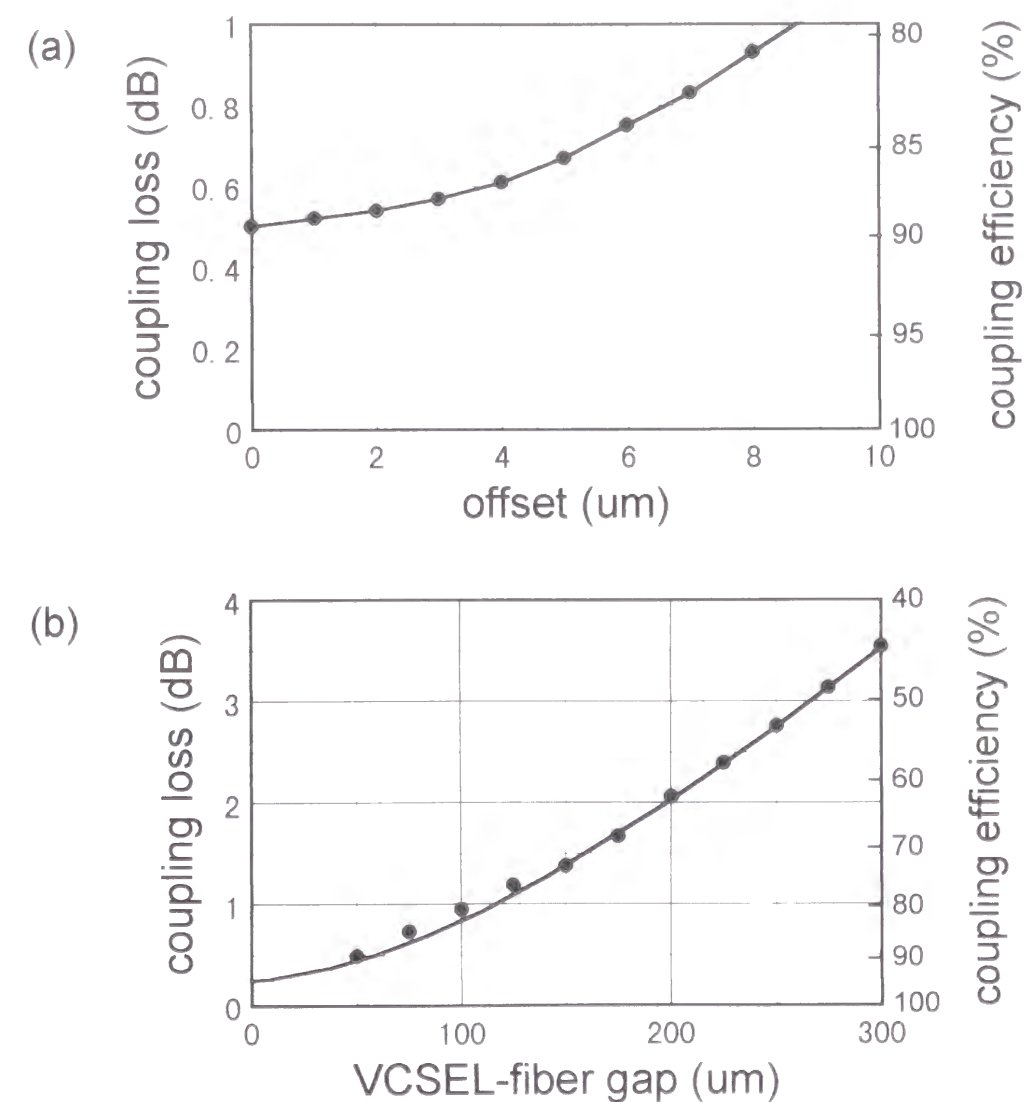


図 4.13 ファイバ光結合損失の VCSEL 位置ずれ量依存性

(a) 横ずれ依存性、(b) 縦ずれ依存性

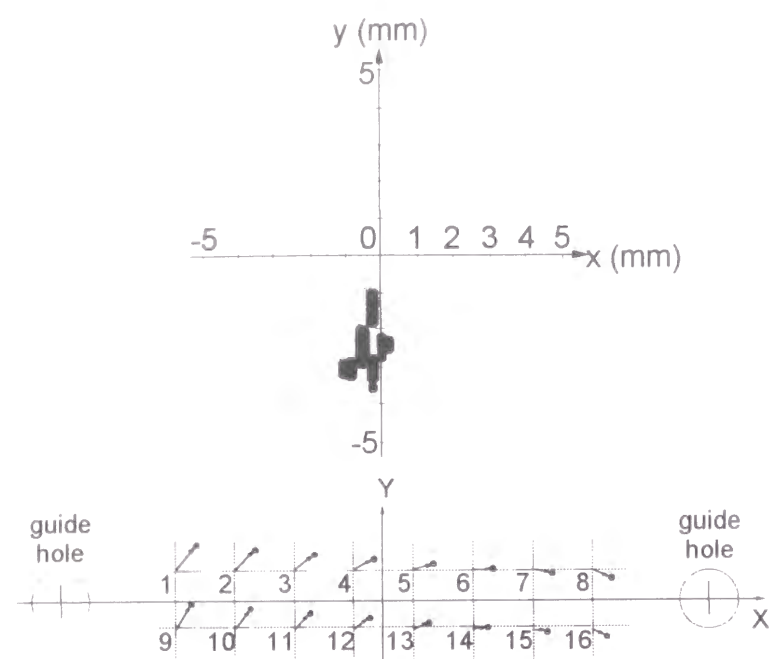


図 4.14 2D-VCSEL の実装位置ずれの X-Y 表示

かる

上記無調芯実装機を用い実装し、実際に測定した 2D-VCSEL の位置ずれと、2D-ファイバのファイバ位置ずれをいずれもガイドピン孔を基準として X-Y 座標表示したグラフを図 4.14 に示す。また、VCSEL 及びファイバの位置ずれ絶対量の頻度分布を図 4.15 (a), (b) にそれぞれ示す。それぞれのずれ量は VCSEL 側で平均 $2.51\text{ }\mu\text{m}$ 、

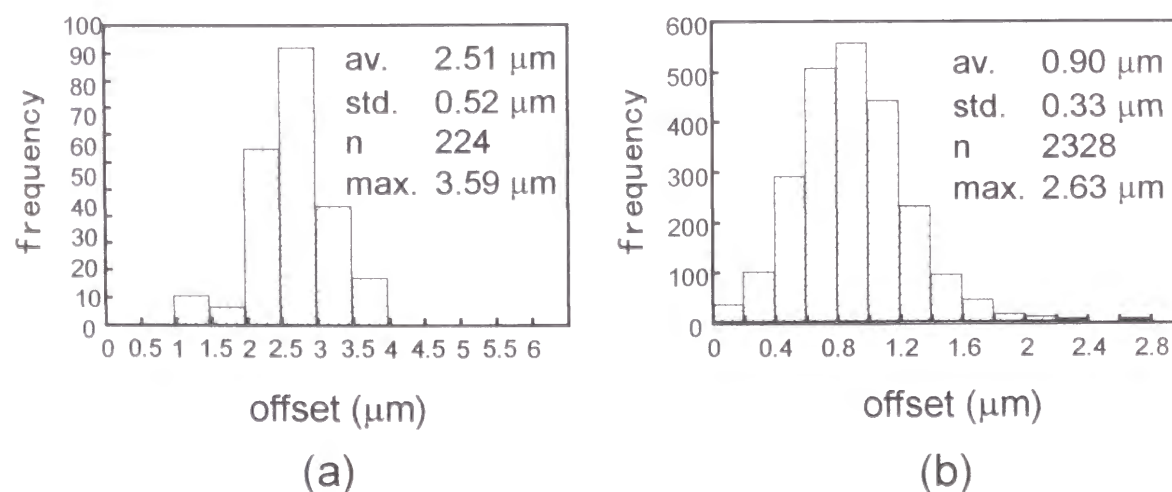


図 4.15 (a) 2D-VCSEL 及び (b) 2D-ファイバの位置ずれ絶対量の頻度分布

最大 $3.59\text{ }\mu\text{m}$ 、ファイバ側で平均 $0.9\text{ }\mu\text{m}$ 、最大 $2.63\text{ }\mu\text{m}$ であった。VCSEL 実装の精度は位置合わせヘッドのバンフ位置精度を向上することにより、さらに低減できる。

(2) 光結合損失

各モジュールのファイバコネクタとの光結合損失を図 4.16 に示す。平均 0.67 dB 、標準偏差 0.15 dB と実用上十分な特性を得ている。この損失はファイバ入出力端でのフレネル反射 0.36 dB 分を除去することにより、さらに低減できる。典型的な光出力-電流特性のモジュール化前後での比較を図 4.17 に示す。光結合効率率は 81% 以上であり、ファイバ端での反射や VCSEL のフィラメンテーションによるキंकは見られない。また、隣接チャンネル間の漏話も -65 dB 以下と十分小さいことを確認した。図 4.18 はファイバコネクタ挿抜の繰り返し信頼性と機械的耐久性を評価したものである。ファイバからの光出力をモニタしながら手動で挿抜を 100 回繰り返した。この時の挿入損失の変動は 0.26 dB であり、ハッケージのガイドピン孔のあそびを反映したものである。また、徐々に増加していくという傾向も見られない。

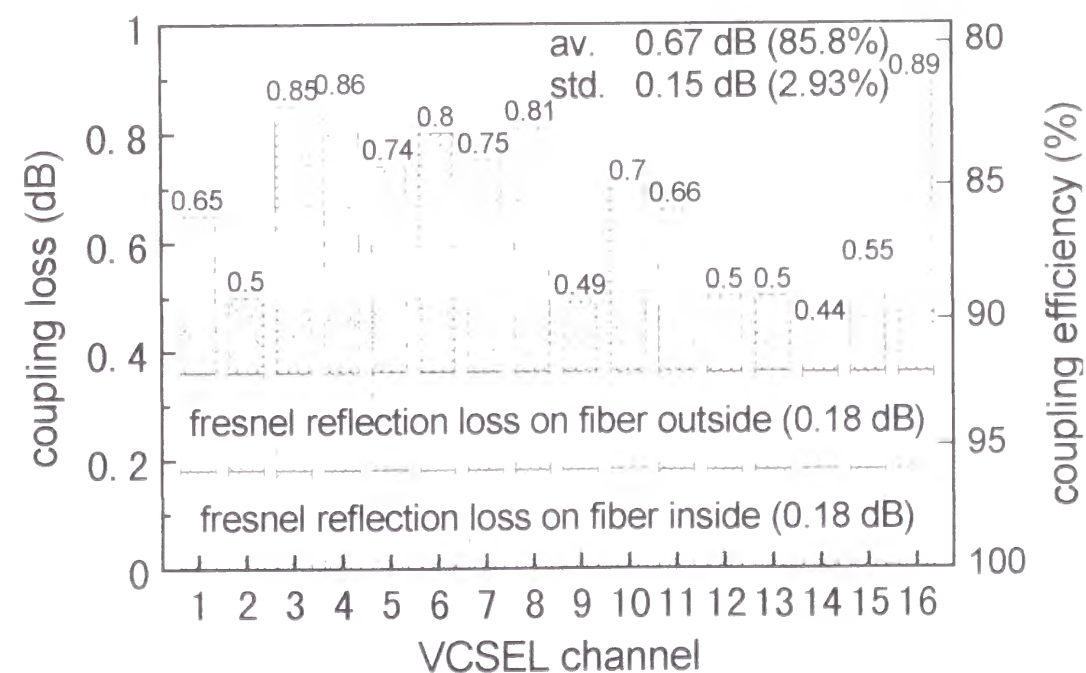


図 4.16 2D-VCSEL モジュールの光結合損失

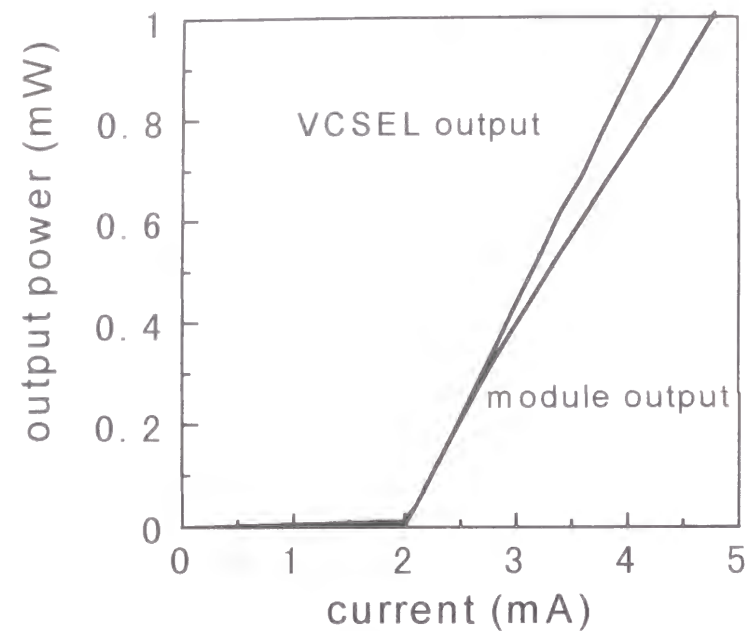


図 4.17 光出力—電流特性のモジュール化前後比較

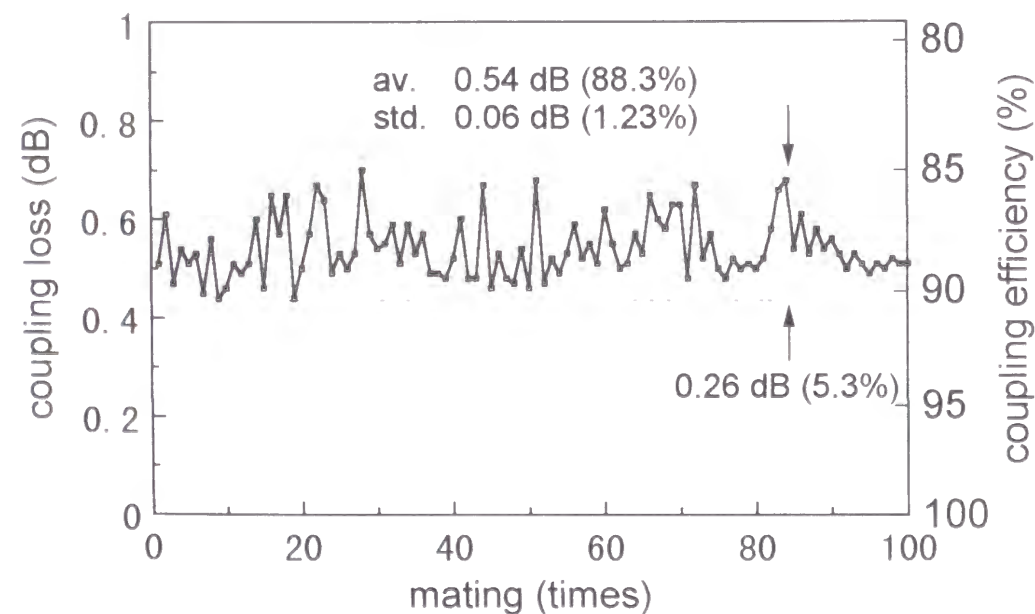


図 4.18 ファイバコネクタ挿抜再現性評価結果

(3) 伝送特性

本モジュールのデータレート 1 Gb/s、NRZ フォーマットでビット長 $2^{23}-1$ 擬似ランダム変調信号伝送時のビット誤り率 (bit error rate, BER) 特性を図 4.19 に示す。 10^{-11} 以下の符号誤り率を得るための最小受信感度は 1D 型で $-25.0 \text{ dBm} \pm 1.0 \text{ dB}$ 、2D 型で $-26.0 \text{ dBm} \pm 0.9 \text{ dB}$ となり、測定範囲内での誤り率飽和 (エラーフロア) は観測されなかった。測定には波形整形、等価処理やアイソレータ等を一切用いていない^{91, 9)}。

上記最小受光感度 (@BER = 10^{-11}) のチャンネル分布を図 4.20 に示す。チャンネル間ばらつきに特徴的な傾向は見られず、この原因は各チャンネルの光出力、光結合損失、配線形状のばらつき等総合的なものと考えられる。

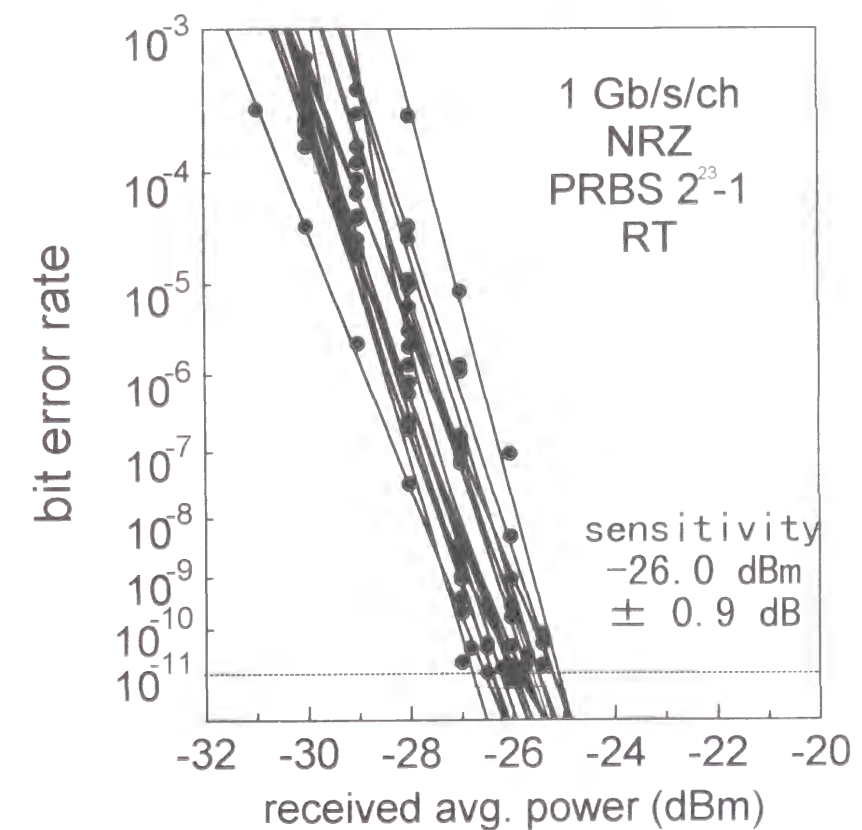


図 4.19 2D-VCSEL モジュールの符号誤り率特性

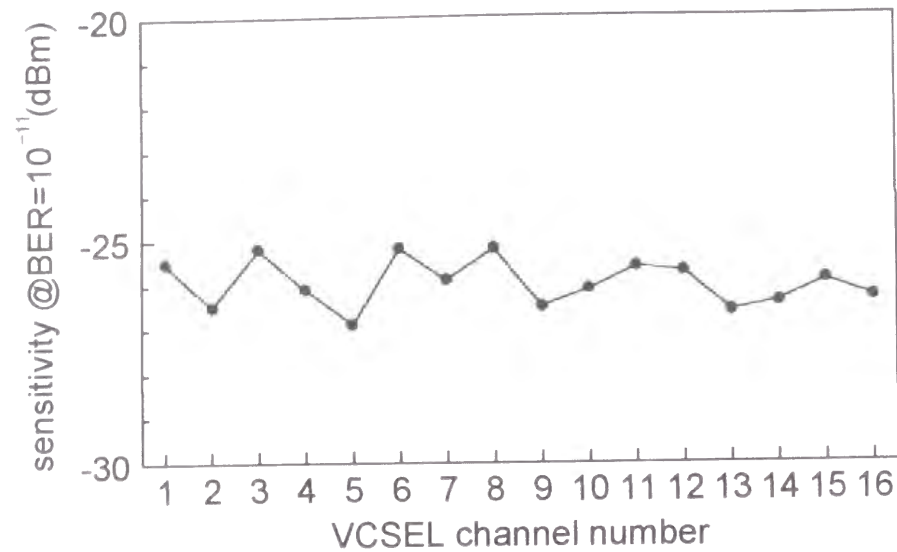


図 4.20 BER = 10⁻¹¹での最小受光感度分布

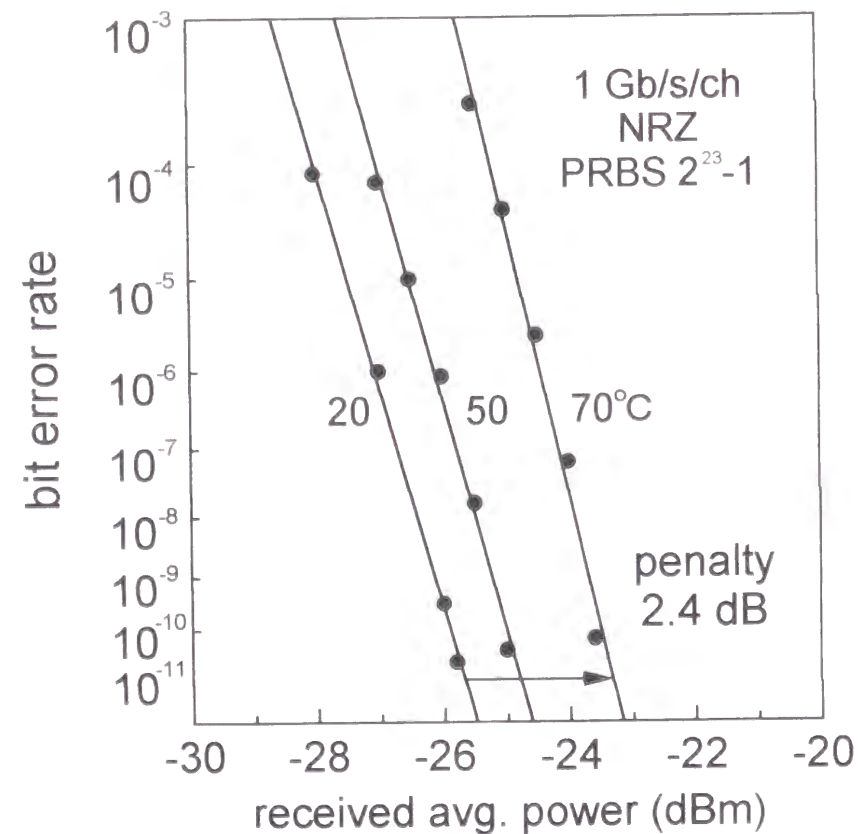


図 4.21 符号誤り率特性の温度依存性

本モジュール動作の温度特性についても評価した。全素子を同時に 7 mA で cw 駆動した時の中心部 VCSEL の昇温は約 20℃であり顕著な I-L 特性の劣化は見られなかった。これは、プラスチック製パッケージを用いても表面の厚膜メッキの効果により過度の昇温のないことを示している。また、環境温度を 20℃から 70℃まで変化させた時の 1 Gb/s 信号伝送実験でも、図 4.21 に示す様に 10⁻¹¹ 以下の符号誤り率を得るためのパワーペナルティが 2.4 dB 以下に抑えられることを確認した。

本章で述べた VCSEL アレイモジュールは図 4.22 の最上部に示した 16 チャンネルの構成であるが、VCSEL アレイの歩留まり、多チャンネルアライメント精度、ルールやコネクタの歪み等を総合的に考慮した結果、並列チャンネル数の限界は図 4.22 の最下部に示した 24×4 の 96 チャンネル程度であろうと考えられる。

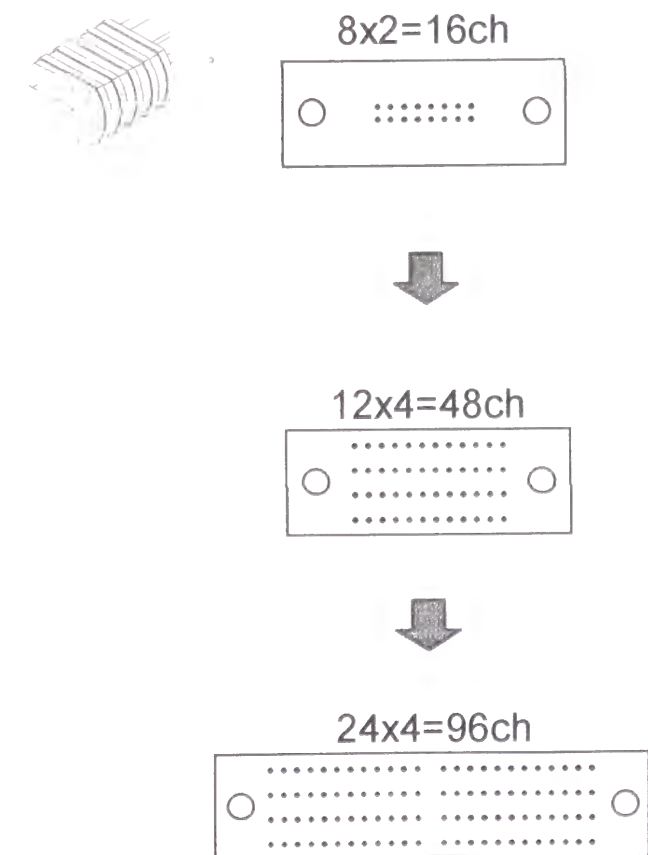


図 4.22 配列チャンネル数限界

ここで示した VCSEL アレイモジュールは図 4.23 に示す様なブロックモジュール集積構造に展開できる。ファイバと今回の発光モジュール (laser diode, LD) あるいは受光モジュール (photo diode, PD) との間に波長多重モジュール (wavelength division multiplexer, WDM)、変調器 (modulator, MOD)、アドドロップマルチプレクサ (add/drop multiplexer, ADM)、スクランブラ (scrambler, SCR)、アイソレータ (isolator, ISO)、プレーナ光回路 (planar light circuit, PLC) 等を挿入することにより、柔軟で部品標準化可能な機能性モジュールが構成可能である。

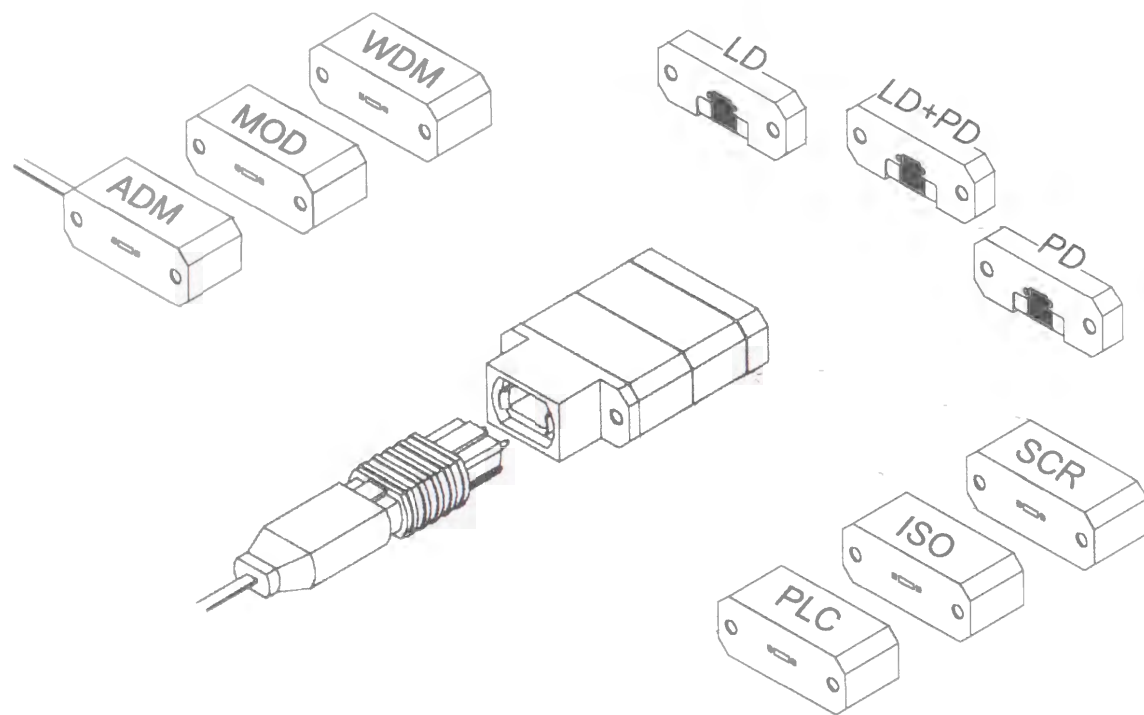


図 4.23 VCSEL モジュールの応用例

4.3 イメージファイバによる高密度並列光データ伝送

前節の構造ではファイバ実装上の限界から、高々100 チャンネル程度の並列伝送に留まるが、コンピュータの進歩により 10 年以内にテラビット級の伝送容量を持つ信号線が必要になり、さらにチャンネル数の不足が予測される。そこで、本研究では並列伝送の究極的の姿である画像伝送並みの高密度並列光データ伝送を目指し、医療用のイメージファイバと二次元面発光レーザアレイとの組み合わせで光データ伝送することを初めて提案し、基礎実証を行った^[94]。本節ではその伝送特性と将来のテラビット伝送の可能性について示す。

イメージファイバ (imager fiber, IMF) は図 4.24 に概念的に示したように、数千から数万の伝送コアがクラッドに挟まれてハニカム状 (三角格子状) に配列されたものである。実験に使用した IMF は極細径型で、画素数 N は 10000、画素径 D は $460 \pm 25 \mu\text{m}$ 、ファイバ径 $510 \pm 25 \mu\text{m}$ 、コーティング径 $570 \pm 35 \mu\text{m}$ である。伝送コアは Ge ドーパしたシリカにより形成されおり、屈折率 n_1 は 1.458 で開口数 (numerical aperture, NA) は 0.4 である。コアの半径 a は約 $2.0 \mu\text{m}$ と極細径で、隣接コア間距離 p は

$$p = \sqrt{\frac{\pi}{2\sqrt{3}N}} D \quad (4.1)$$

より、 $4.4 \mu\text{m}$ と求められる。クラッドの屈折率 n_2 は、NA に関する以下の関係式より

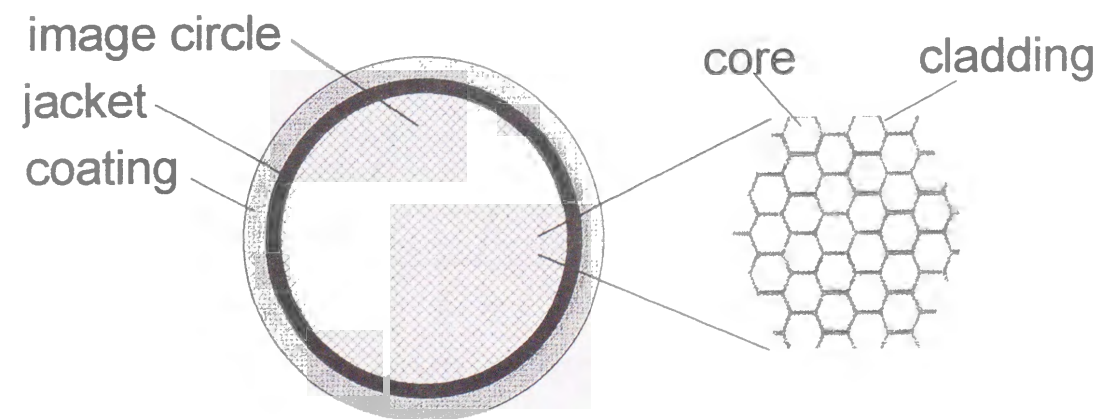


図 4.24 イメージファイバの構造概略図

求められる

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (4.2)$$

ここで Δ は屈折率比で

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (4.3)$$

で与えられる n_1 及び Δ は厳密には λ_0 の関数であり、上記 IMF のパラメータは HeNe レーザ (波長 6330 Å) で測定したものであるが、ガラスのこの波長帯での材料分散は小さく、これらを一定としても誤差は小さい。式 (4.3) よりクラッドの屈折率 n_2 は 1.402 と求まるが、後で述べる様に入射光の焦点をぼかした場合にはコアに対するクラッドの屈折率は実効的に下がり、以下の式で表されるコアの充填率 (filling factor, ff)

$$ff = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \left(\frac{a}{p} \right)^2 \quad (4.4)$$

76% を考慮した実効屈折率 n_{2eff} は

$$n_{2eff} = ff \cdot n_1 + (1 - ff) \cdot n_2 \quad (4.5)$$

より 1.444 となる この n_{2eff} を式 (4.3) に用い、ファイバ中の伝播特性を特徴付ける規格化周波数 v が以下の式より求まる

$$v = \frac{2\pi}{\lambda_0} a n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (4.6)$$

ここで λ_0 は真空中の波長である。

可視光の波長 0.45 から 0.8 μm では v が 3.3 から 5.6 の範囲にある。従って、図 4.25 の規格化伝播定数と規格化周波数の関係を表す図より、可視光領域では 2 本から 6 本のモードが共存する多モード状態となることがわかる。しかし、この多モードファイバを可視光伝送媒体として利用する場合には、モード不安定性が生じ、高次モードによる漏話とこれに起因する背景雑音の影響が出る⁹⁵。これに対し、本 VCSEL の発振波長である 0.98 μm では $v = 2.5$ となるため、伝送モードは LP_{01} のみに限定された単一モード状態となる。高次横モードの伝播が抑制されることに伴い、これによって生じるコア間の漏話を排除することができ、背景雑音を低減できる。また、コア径が 460 μm と大きいために、VCSEL アレイとのファイバ位置合わせ精度を高くすることなく、大容量の並列伝送が可能となる。さらに、全体の最小曲半径は 50 mm 小さく、通常ファイバを束ねたものに比べてはるかに柔軟性に富んでいる。今回用

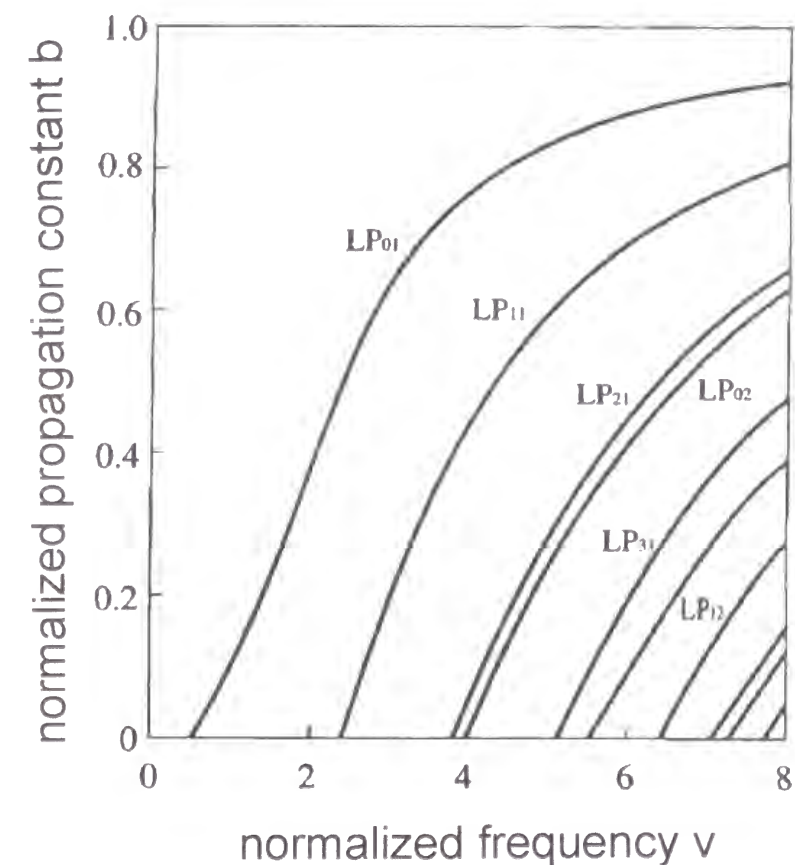


図 4.25 規格化伝播定数と規格化周波数の関係

いた IMF は長さ 1 m であるが、100 m 以上のものも作製可能である。しかしながら、現状では歩留まりの関係からあまり長いものは高価になってしまうという課題はある。伝送損失の点では $0.5\text{ }\mu\text{m}$ から $2\text{ }\mu\text{m}$ までの波長範囲で 0.01 dB/m と問題ない。

図 4.26 に CCD カメラで観測した、VCSEL 6×6 アレイからの発光を並列伝送した時の IMF 端の光出射波形を示す。VCSEL からの出射光は一つのビームが 10 コア程度をカバーする様に IMF 端面から意図的に焦点をずらしてある。これにより、安定したビーム結合が得られ、また上述のように単一モードとすることができる。IMF 端でのビーム間隔は約 9 コア分に相当する $46\text{ }\mu\text{m}$ である。伝送後の端面像は VCSEL アレイの像をほぼ保っており、伝送による歪みのないことがわかる。

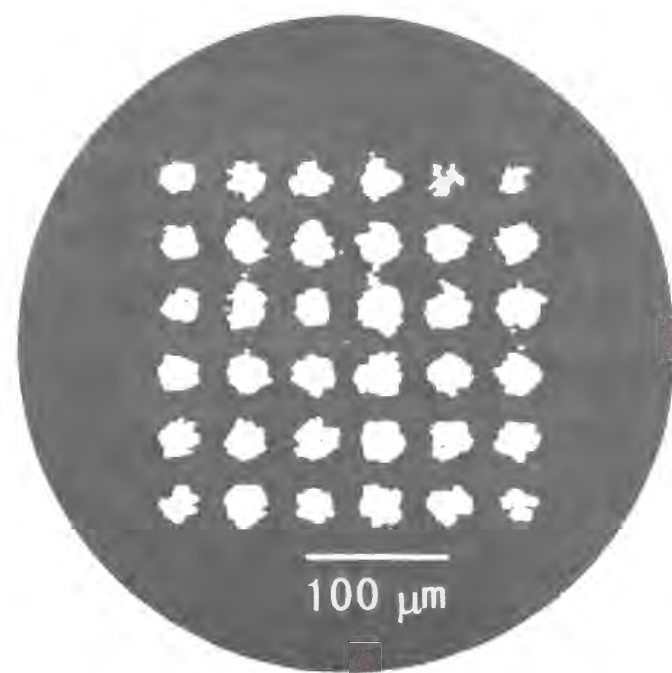


図 4.26 VCSEL アレイからの光出力のイメージファイバ伝送ファイバ端での近視野像を観測したもの

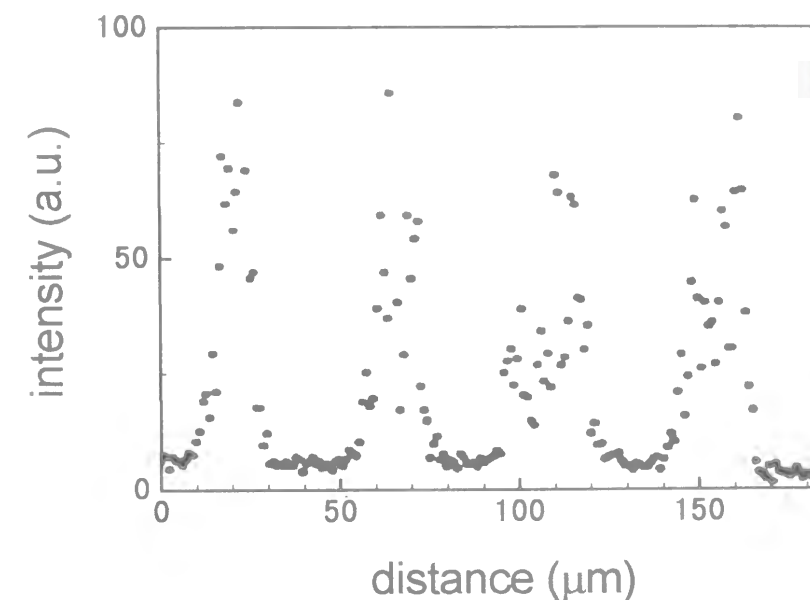


図 4.27 イメージファイバ伝送後のファイバ端での光強度分布

図 4.27 に IMF の出射端面での光強度分布を示す。これより、ビーム間の静的な漏話はほとんどないことがわかる。また、0 Hz から 3 GHz までの動作周波数における動的漏話を図 4.28 に示す。最近接 (nearest neighbor, NN) の第 2 近接間 (2NN)、第 3 近接間 (3NN)

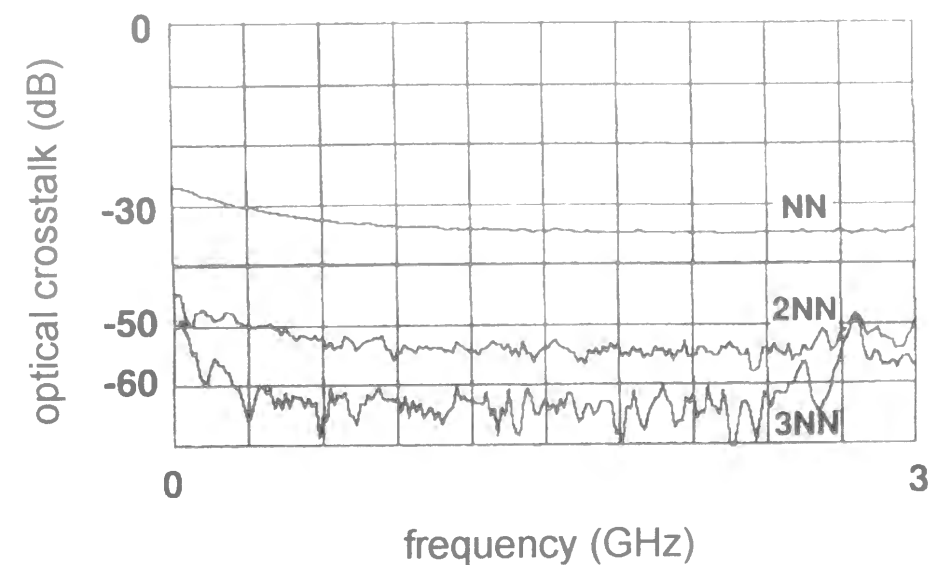


図 4.28 ビーム間漏話の周波数依存性。最近接間 (NN)、第 2 近接間 (2NN)、第 3 近接間 (3NN)

と離れるに従い、動的漏話も -28 dB 、 -45 dB 、 -50 dB と減少していき、最近接の場合でも -28 dB 以下と十分小さいことがわかる。これより、前述のように伝送に寄与するモードが一本に限定されており、漏話の原因となる高次の漏洩モードが抑圧されていることがわかる。

実際に VCSEL からの高周波変調信号を、この IMF を用いて伝送実験を行った。図 4.29 に 1 Gb/s 、NRZ2¹⁵-1 擬似ランダム波形伝送時の光変調波形を示す。VCSEL のバイアス（直流印加）電流とハルス電流はそれぞれ 3 mA 、 5 mA である。伝送による光変調波形の劣化は見られなかった。この時の IMF 入出力端での結合損失は 1.1 dB である。現在のところ 36 ch までの並列伝送が可能であるため、 100 Gb/s 規模の伝送容量が実現できることになる。IMF の良い点は、ファイバ両端での位置合わせの一方削減できる点と、数十もの多チャンネル信号を比較的柔軟で見掛け上一本のファイバで伝送できる点である。

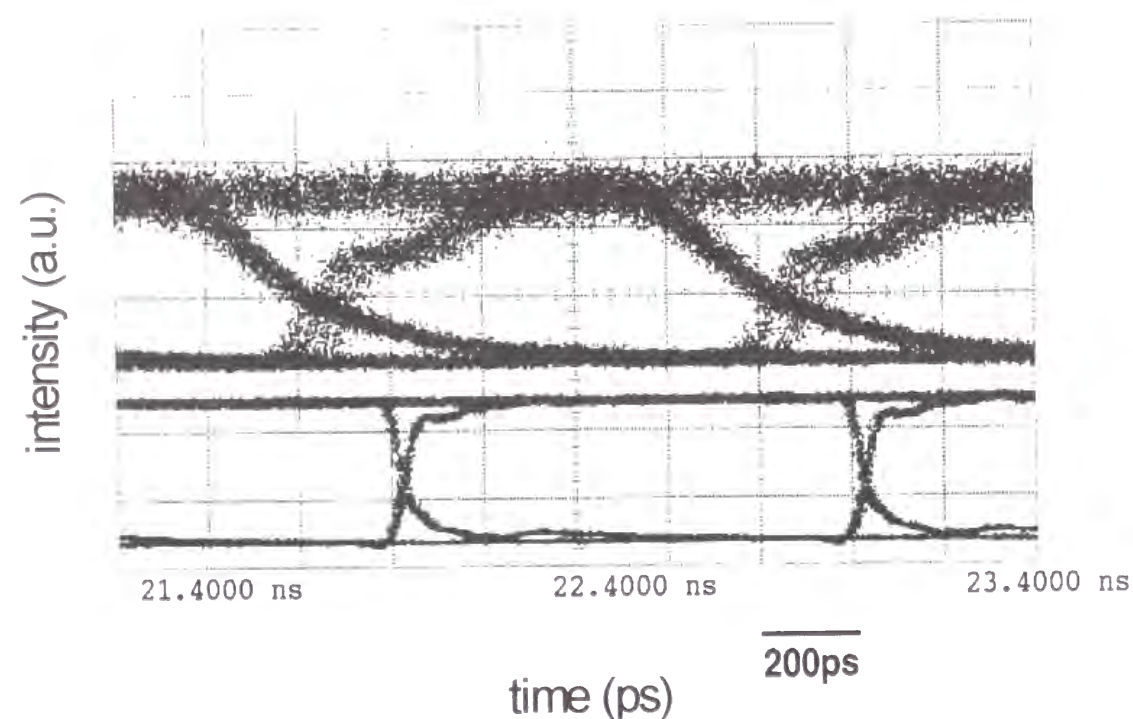


図 4.29 1 Gb/s 擬似ランダム波形伝送時の光変調波形（上）と入力信号電圧（下）

4.4 大口径プラスチッククラッドファイバによる光データ伝送



図 4.30 GI-PCF の構造概略

単一チャンネルの光データ伝送においても、位置合わせコストをできるだけ簡便にし、実装コストを低減することが重要である。大口径ファイバとして、全ガラスファイバ（all glass fiber, AGF）、全プラスチックファイバ（plastic optical fiber, POF）及びプラスチッククラッドファイバ（plastic cladding fiber, PCF）の 3 種類があるが、特に直径 $200\text{ }\mu\text{m}$ と大口径化でき柔軟性、コネクタ加工性に優れ、しかも $0.98\text{ }\mu\text{m}$ 帯低損失な PCF が有望である。

PCF は図 4.30 に示す様にコアがガラス、クラッドがプラスチックで構成されており、広波長域で損失が約 5 dB/km と少ない（図 4.31）。またコア径は $200\text{ }\mu\text{m}$ と通常の多モードファイバ（multimode fiber, MMF）に比べても 4 倍と大口径化が可能であり、圧着カット型の低価格コネクタが使用できるという利点がある。

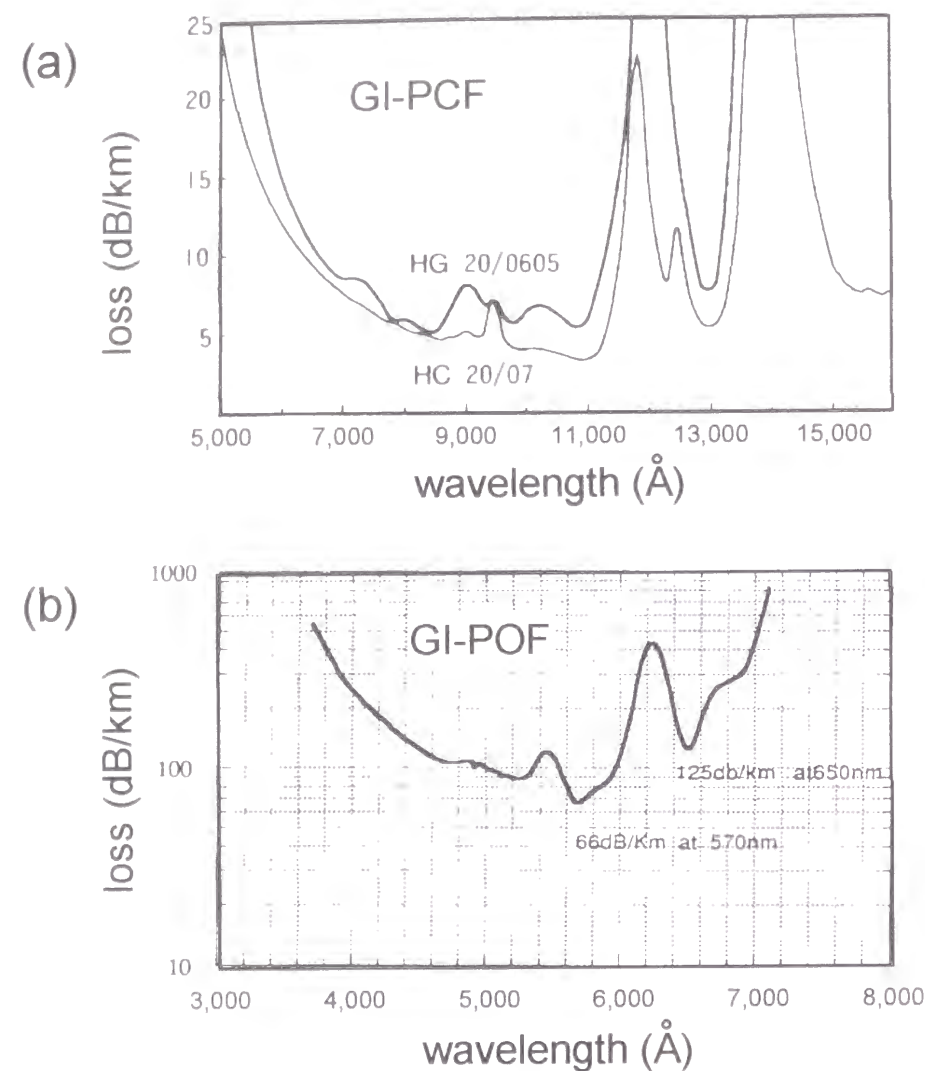


図 4.31 PCF と POF の伝送損失の比較

本実験には GI 型 PCF（住友電工製 CCV-HG-20/06）を用いた。コア径は 200 μm 、NA は 0.4 である。これらのパラメータから前述の式 (4.2) 及び (4.6) を用いて規格化周波数 v は 512 と求まる。ファイバ中の導波モードの数 N は、 N が十分大きい時、近似的に以下の式で表せ、

$$N \cong \frac{2v}{\pi} = \frac{4}{\lambda} a n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (4.7)$$

本 PCF では 326 と十分大きくなる。これは単一モードの逆の極限であり、モード数 41 と中間的なモード数を持つ通常の多モードファイバ (50 μm ϕ) に対して伝送信頼

性の点で有利となる。つまり、通常モジュールファイバ間、あるいはファイバ間ではある程度の位置合わせずれが必ず生じる。これにより、モード間引きが生じ、ファイバの振動あるいは光源や受光部の温度変化によりこの間引きモードが時間的に変化することになる。この時間的な変化が伝送時の雑音となって現れる。これは一般的にモーダル雑音と呼ばれる現象で、伝送上これを如何に排除するかが重要となる。伝送モードが連続的に存在することにより、この時間的な変動は不連続なスペクトル的なものではなく、連続したものとなる。これにより、返って雑音を減少させることが可能となる。

図 4.32 に MMF と比較したファイバ間結合損失と、これに伴う伝送速度 1 Gb/s のパワーペナルティの、ファイバの位置合わせずれに対する測定結果を示す。これらを

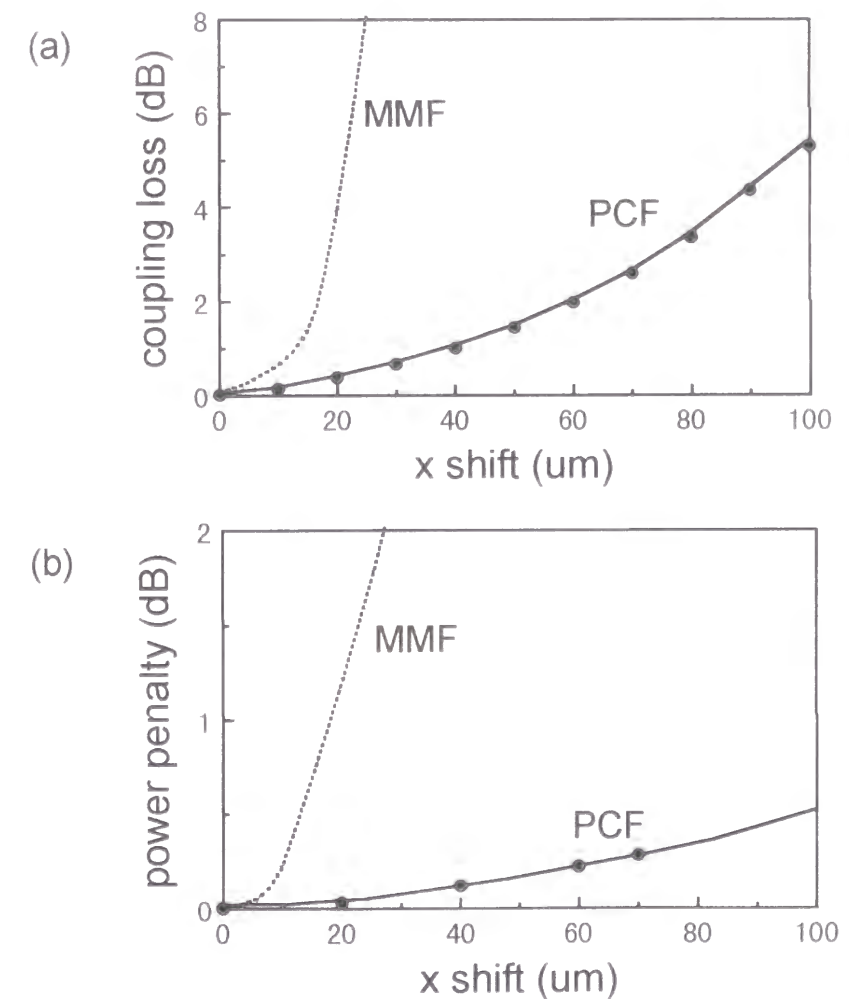


図 4.32 PCF 及び MMF の接続損失

(a) 及びパワーペナルティ (b) の軸ずれ依存性

合わせた光量損失を 0.5 dB まで許すとすれば、軸ずれ許容度は MMF では $7\text{ }\mu\text{m}$ であるのに対して PCF では $22\text{ }\mu\text{m}$ となり、機械加工精度の位置合わせでも十分調心可能となる。VCSEL と PCF の組み合わせにより、3 Gb/s で 100 m、2 Gb/s で 500 m、1.5 Gb/s で 1 km の光信号伝送を確認した (図 4.33)。光入力信号は疑似乱数ビット列 (ビット長 $2^{15}-1$ 、NRZ) で変調してある。100 m でのビットレートはハルス発生器による限界である。入出力端での光結合損失は 1.4 dB であった。⁹⁶

ここで示した PCF を用いた伝送法は、最近盛んとなっている POF を用いた伝送と目的は同じであり、実際にある程度距離のある応用では本 PCF が採用されている。面

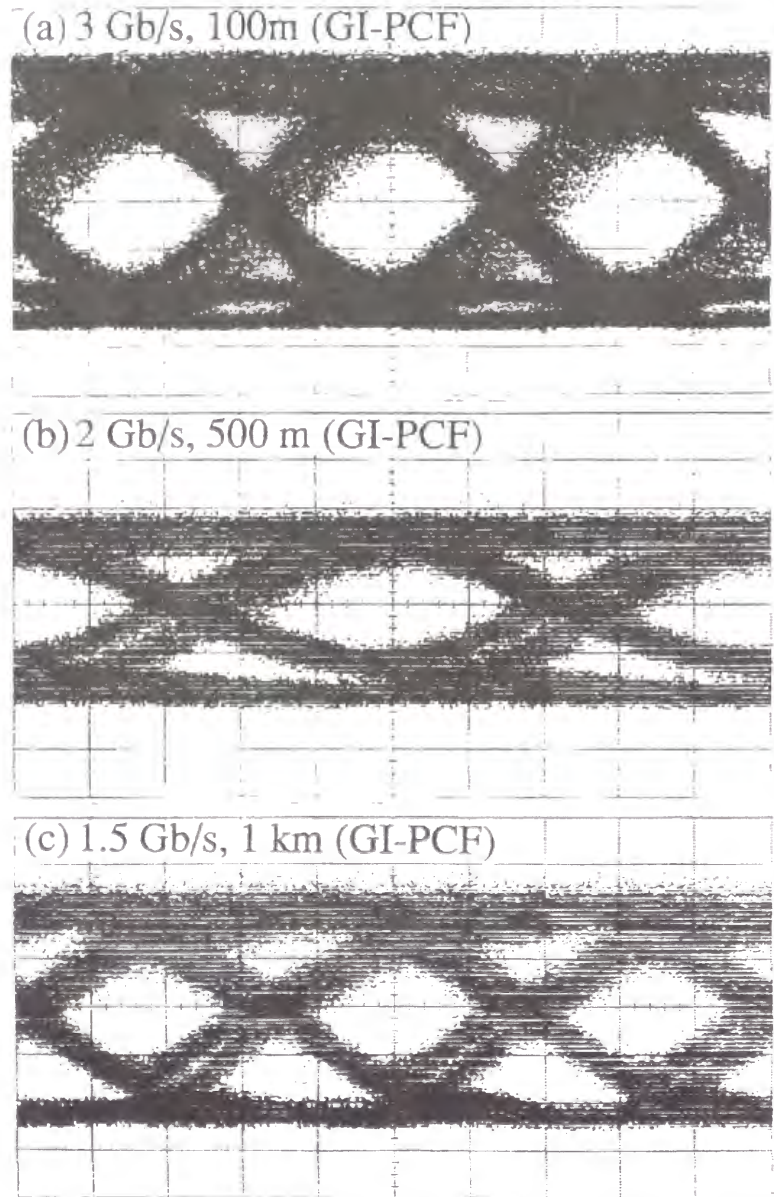


図 4.33 PCF 伝送後の光変調波形の伝送長依存性

発光レーザを用いた並列伝送でも、この PCF を用いることが最近脚光を占めている。家庭内通信網 (ホームネットワーク) 市場を拡大するためにいずれ重要な要素技術になることが予想される。

図 4.34 に PCF と IMF の伝送実験結果をまとめ、他の光ファイバあるいは電線との伝送リミットを比較した。PCF は 1 Gb/s-km 程度の中距離データ伝送に十分な伝送特性を示し、また IMF は数 10 m と短距離ながらもギガビット以上の高速伝送が必要な並列計算機に有効であることがわかる。

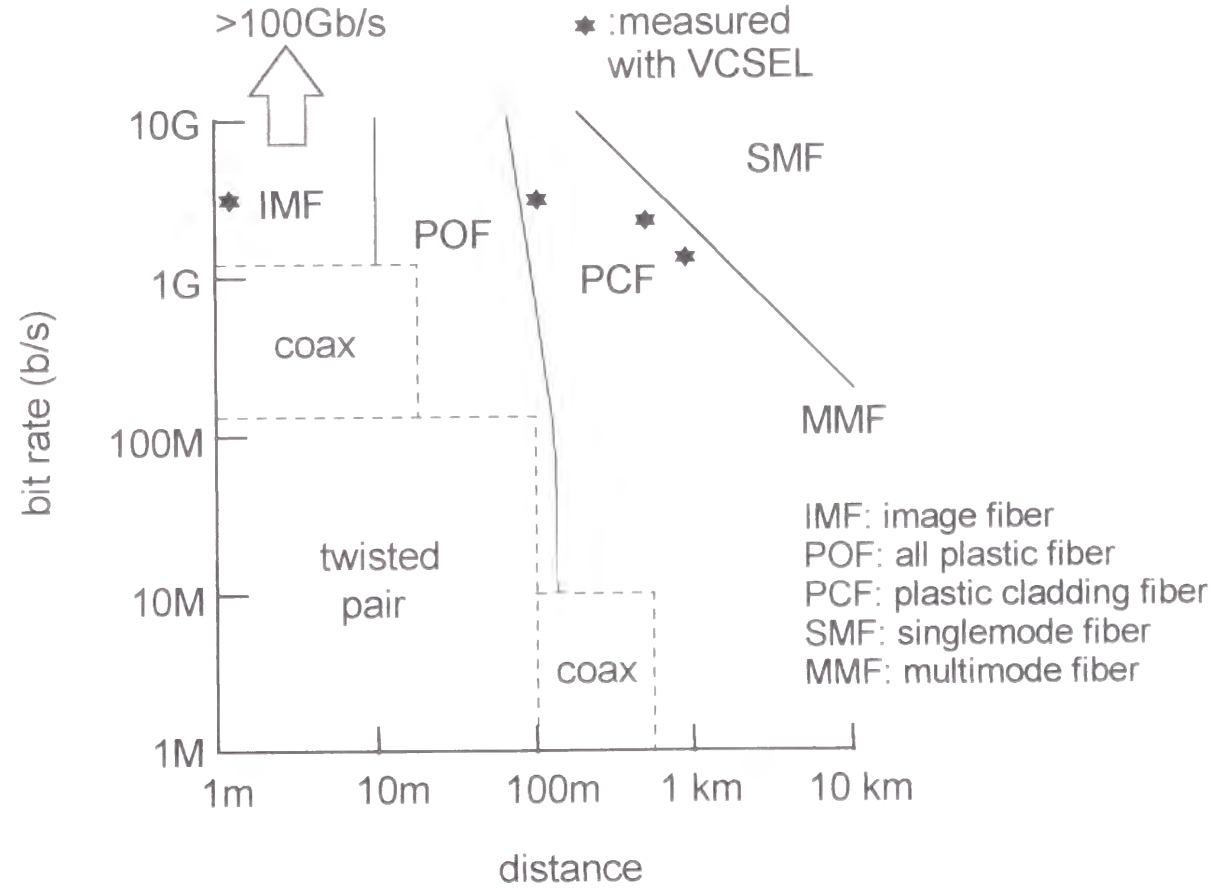


図 4.34 本研究で得られた PCF 及びイメージファイバの伝送特性の他媒体との比較

4.5 まとめ

本章で、VCSEL の光データ伝送応用に目を向け、特に応用が期待される高密度並列光伝送の可能性を明らかにした。従来 VCSEL を使いながらも1次元アレイに留まっていた VCSEL 伝送モジュールを、本研究で初めて2次元アレイモジュール化することに成功した。光ファイバとの2次元一括自導位置合わせが可能な構造を考案、プラスチック整形技術との融合で一括挿抜を可能とするなど、VCSEL の汎用性を高め、実際に試作したモジュールで評価を行い、ファイバコネクタとの直接接続で0.67 dB の平均損失を得た。また1 Gb/s の伝送速度で符号誤り率 10^{-11} となる最小受信感度 $-26.0 \text{ dBm} \pm 0.9 \text{ dB}$ となり、誤り率飽和のない良好な伝送特性を得た。また、この2次元集積性を極限まで追求した例としてイメージファイバによる2次元一括並列伝送を考案し、実際の測定で隣接信号漏れ -28 dB 以下の低背景雑音と、1 Gb/s $\times 36 \text{ ch}$ の伝送を実証することにより、超高密度大容量並列光信号伝送の可能性を明らかにした。さらに、面発光レーザの一般家庭への普及を目指した大口径プラスチックフッドファイバによる簡易伝送モジュールについても基礎評価を行い、軸ずれに強いモジュール形態の提案を行うとともに、実際に3 Gb/s $\times 100 \text{ m}$ 以上の伝送が可能であることを示した。

5.1 まえがき

本章では面発光レーザのもう一つの重要な応用である光スイッチ応用について述べる。前章の光データ伝送は単なる一対一の伝送であったが、実際の光データ伝送網を構成するには各接点において信号を切り替える必要がある。また、コンピュータの光化を図る上でも光路選択の機能なくしては単なる電気配線の置き換えに過ぎない。本研究では面発光レーザの高集積性に着眼し、伝送チャンネルを送信側で切り替えることにより光路選択を可能とした。本方法は伝送路の障害対策向けクロスコネクタの応用も考えられ、面発光レーザの市場を格段に広げる可能性を持つ。さらに完全結合網（フルクロスバ）型の伝送線路構成で多対多の双方向光データ伝送網が構成可能であることを初めて提案し、実際にプラスチック整形技術との融合で実用的試作を行った。網構成は単純であるが、再帰的な並列演算処理を行おうとするコンピュータ応用では重要な構成である。

5.2 分散型ファイバスイッチによる光回路網

まず、本節で提案する分散型ファイバスイッチ（distributed fiber switch, DFS）について説明する。DFS では図 5.1 に示すように、コンピュータ、プロセッサ、ボード等のプロセッサエレメント（processor element, PE）のそれぞれに空間的なアドレスを割

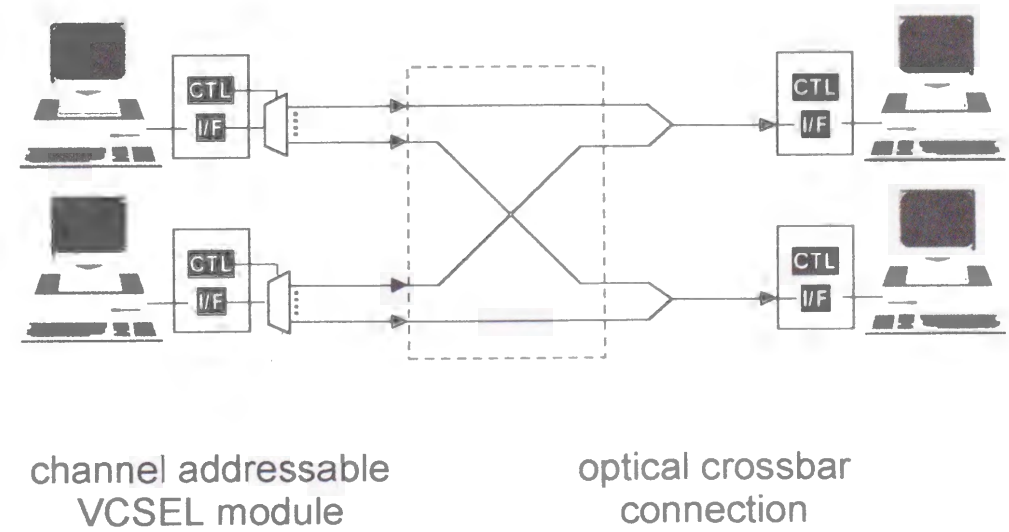


図 5.1 チャンネル選択型 VCSEL モジュールによる光クロスバスイッチ応用

り付け、アドレスを選択することにより選択的にPE間で相互通信を行う。このアドレス空間に光ファイバを割り当て、完全結合網接続を行う。アドレスの選択は各光ファイバに対応させた面発光レーザ（VCSEL）をアドレスコントロール回路（control, CTL）により選択することにより行われる。

従来一般的な規格であるファイバチャンネル（fiber channel, FC）等では、ハス切り替えを行うサーキットスイッチ（circuit SW）と信号ハケット（フレーム）を切り替えるフレームスイッチ（frame SW）のハイブリッド構成を取っており、信号伝送時にも光信号を一旦電気信号に変換し、電氣的スイッチを介して信号が伝送される。また、フレームスイッチの前後にタイミングを取るためのバッファが必要となる。これに対し、本提案の分散型ファイバスイッチでは、コントロール処理のみを電氣的に行い、ICのブリックと呼ばれるスイッチ部は高速の光スイッチで置き換えられており、バッファも各端末にのみ配置すればよい。このDFSの具体的な実現構成を示したのが図5.2である。各PEに配置されたVCSELアレイ中の送信先PEに対応するチャンネル（アドレス）が選択され、そのVCSELから出る光信号が一本一本接続された光ファイバアレイによって中央の光クロスコネクタ（optical cross connector, OCC）まで伝送される。OCCの入射側プラグ（multifiber plug）では光ファイバアレイが一次元方向に展開され、OCCでマトリクス状（積和演算状）に出射側の導波路カプラ（waveguide coupler）へとコネクタ接続される。つまり、同一番地の光信号は全て導波路カプラによって一つのファイバポートへと結合することになる。この構成は方式的には空間アドレス型の空間多重（spatial division, SD）方式であり⁹⁷、先に分散型と呼んだのはハス選択が各PE端末で分散的に行われるためである。FC等の集中型のスイッチに比した利点は、信号の遅延が少なく、広帯域で、信号の衝突が最小限に抑えられるため、柔軟で大規模なシステム構成が可能となる点にある。

本OCC構成の提案は、先に説明したDFSの構成で単にスイッチ部にVCSELを配置したというだけでなく、平面展開制限によってチャンネル数が制限されがちなクロスバ接続部を立体的に配置してチャンネル数を格段に増やせる構成とした点で重要である。

次節では能動光素子にあたるチャンネル選択型のVCSELについて述べる。

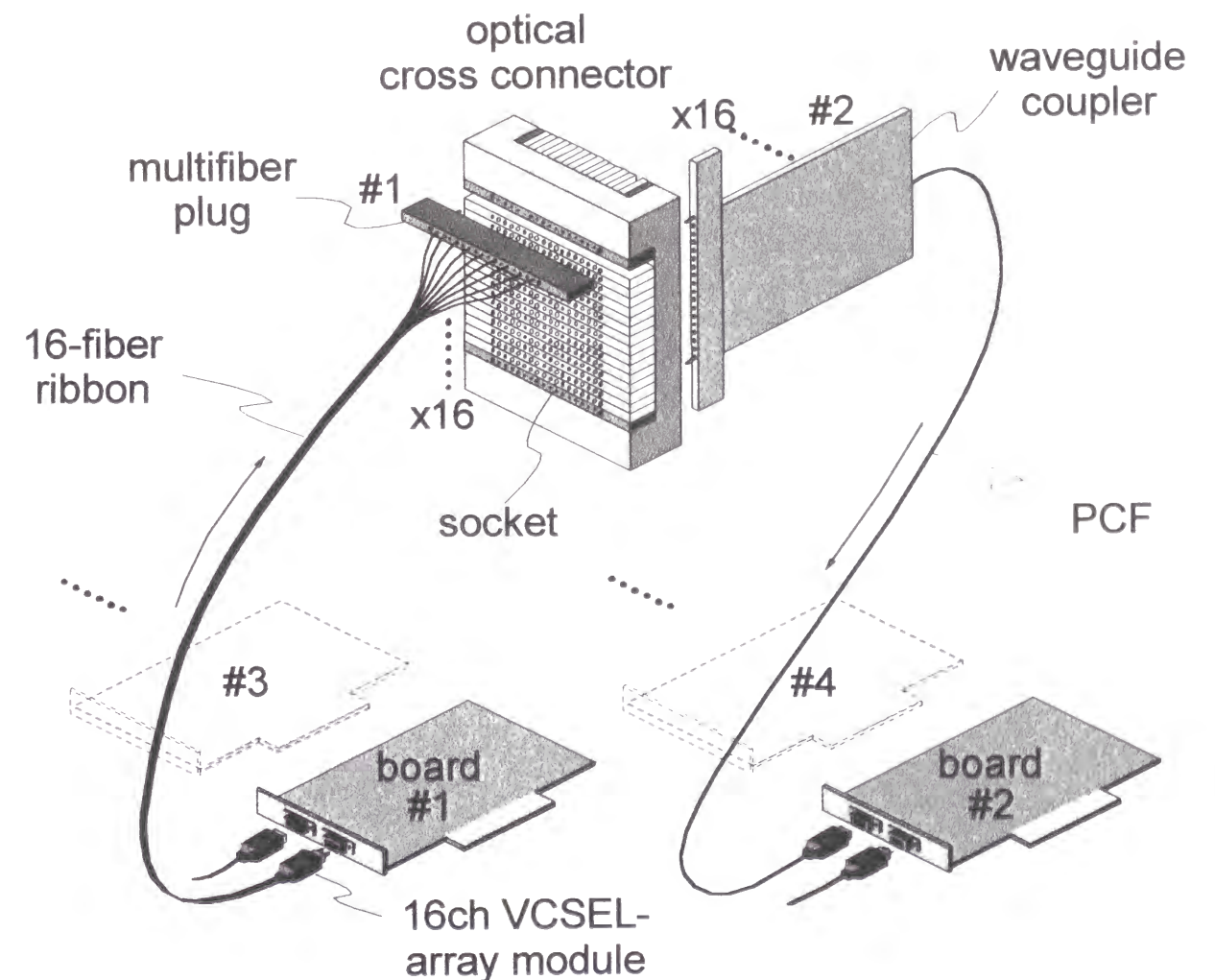


図 5.2 分散型ファイバスイッチの概略構成図

5.3 チャンネル選択型 VCSEL

面発光レーザの最大の利点は多チャンネル性であり、これを積極的に利用すれば前節で提案した DFS ような大規模な空間分割多重 (spatial division multiplex, SDM) 型光スイッチが構成できる。本節ではその基本要素となるアドレス選択機能を付加した面発光レーザについて述べる。面発光レーザを使用した伝送モジュールではこの様な付加機能を持つ構造は未だ例を見ない。

5.3.1 素子構造

最初に実際に作製したチャンネル選択型 VCSEL モジュールの全体写真を図 5.3 に示す。また、実装部の概略構造を図 5.4 に示す。ドライバはパッケージ (プラスチック製) に埋め込まれたヒートブロック (銅製) 上に融着固定され、VCSEL とワイヤーボンディングされている。本パッケージはガイドピン孔によって高精度にファイバコネクタと一括挿抜可能である。パッケージ寸法は $25 \times 10 \times 4$ mm で、プラスチック母材上に立体メッキ配線 (molded interconnection device, MID) が施されている。

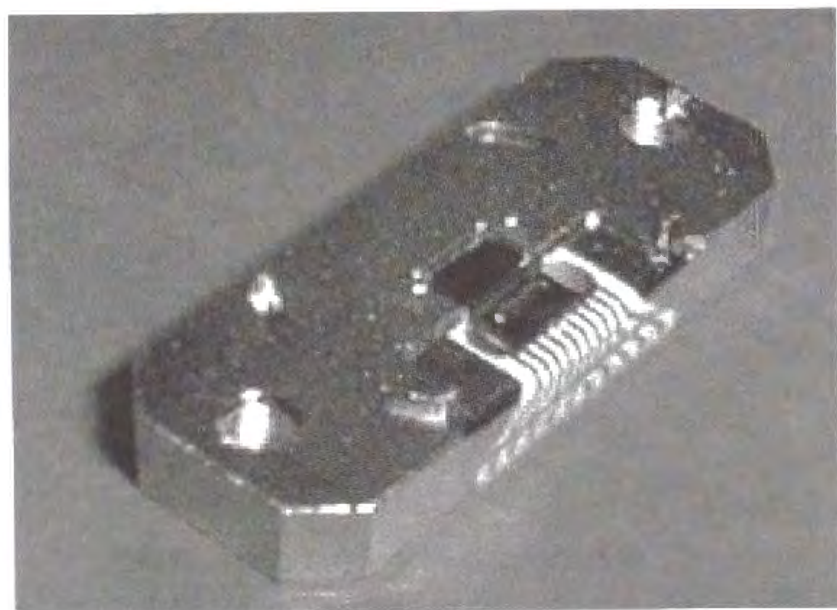


図 5.3 チャンネル選択型ドライバ搭載 2D-VCSEL モジュールの全体写真

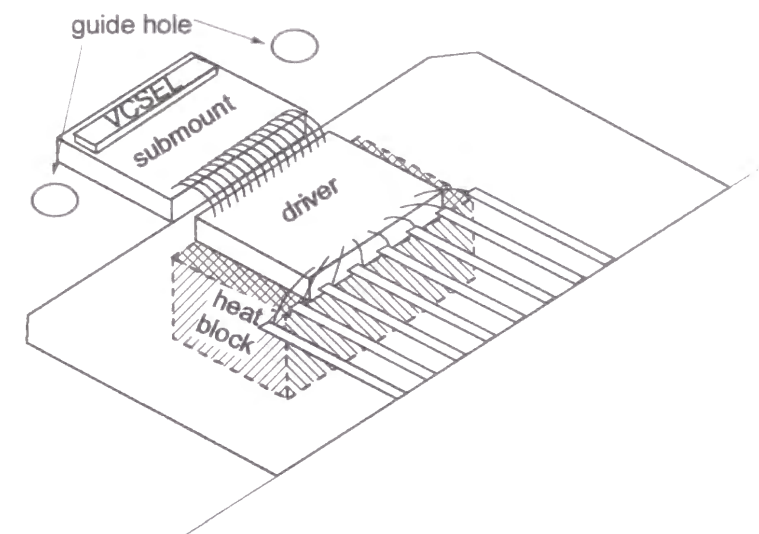


図 5.4 チャンネル選択型ドライバ搭載 2D-VCSEL モジュールの実装部の概略構成図

ドライバチップ全体の写真を図 5.5 にまた機能構成図を図 5.6 に示す。アドレス信号 (address, ADR) をデコードして 16 ch の VCSEL 中 1 ch を選択しデータ信号 (DATA) で駆動する。VCSEL 駆動出力はコントロール信号 (control, CNTL) でバイアス調整可能となっている。ドライバの寸法は $3.2 \times 2.0 \times 0.5$ mm である。

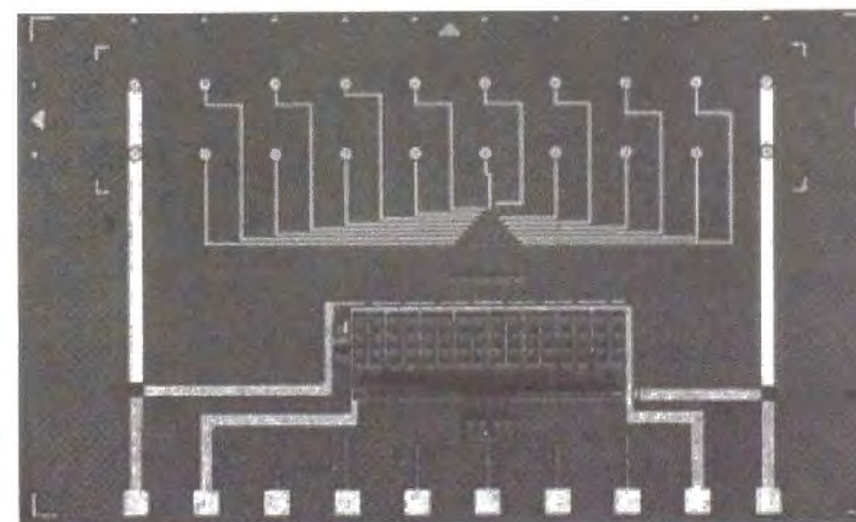


図 5.5 チャンネル選択型 VCSEL ドライバ (写真)

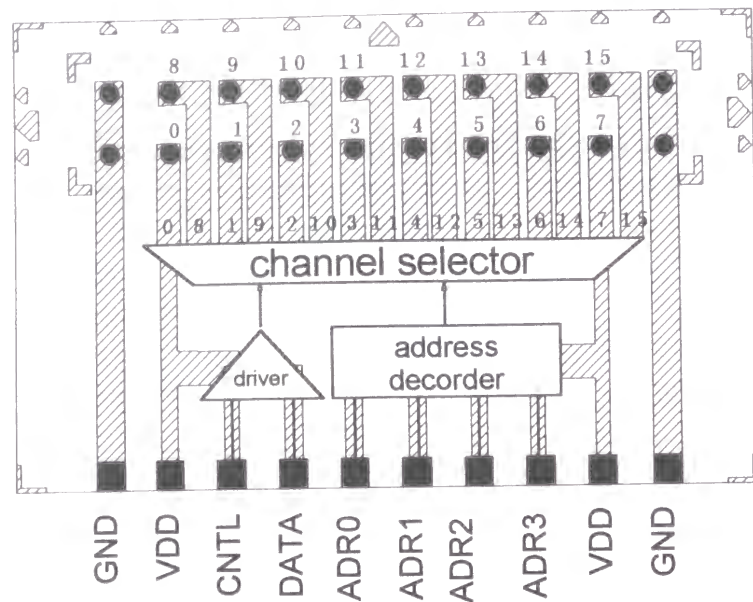


図 5.6 チャンネル選択型 VCSEL ドライバ (機能構成図)

本ドライバの回路構成を 2 ch 分に簡略化して図 5.7 に示す。0.25 μm ゲート幅の AlGaAs/InGaAs 製 H J F E T 構成で、電源電圧は +5 V 単一、信号電圧は low が 0 V、high が 1 V、全消費電力は 750 mW \sim 1 W、設計動作速度は 2.5 Gb/s 以上である。

図 5.6 の出力側電極配列からもわかるように、本ドライバは 2 次元アレイ状の

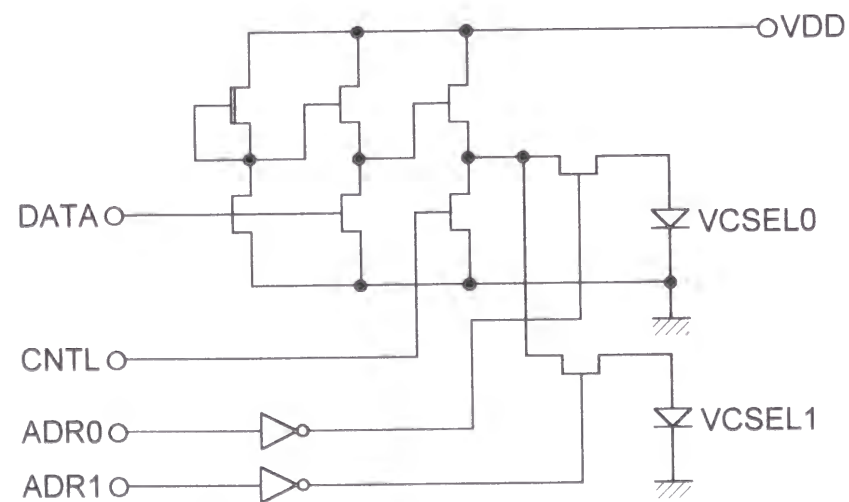


図 5.7 チャンネル選択型 VCSEL ドライバの回路構成

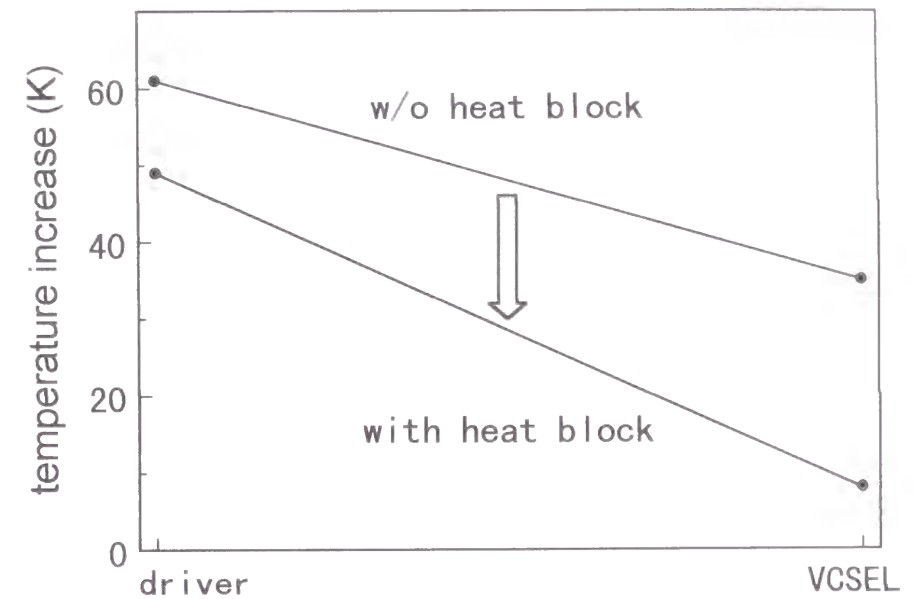


図 5.8 モジュール各部のヒートブロック効果

VCSEL チップを直接フリップチップ実装可能な構成としてある。しかしながら本構成での実装評価の結果、ドライバの発熱による VCSEL の特性劣化が著しく、VCSEL とドライバを分離実装した。良好な放熱性を確保するためヒートブロックをドライバ直下に埋め込んである。この放熱効果を確認するため、ヒートブロック有無でのドライバ部と VCSEL 部の上昇温度の違いを測定した (図 5.8)。ヒートブロックの使用により、ドライバ部の温度上昇が 2 割抑制されるだけでなく、ドライバー VCSEL 間をプラスチックで熱遮断した効果も重なって VCSEL 部の温度上昇は 10 $^{\circ}\text{C}$ 以下に抑制された。

5.3.2 素子特性

コントロール (CNTL) 電圧を 0.5 \sim 0.9 V まで変化させた時の VCSEL からの光出力のデータ (DATA) 電圧依存性を図 5.9 に示す。コントロール電圧 0.7 V 時に、データ電圧 0.6 V を閾値として low 時 1 μW 以下、high 時 0.7 mW 以上 (消光比 28 dB 以上) とほぼ設計通りの光出力特性を得た。

アドレス信号 (ADR) 入力波形の変化による VCSEL 光出力波形の変化を図 5.10 に示す。16 ch 中 4 ch 分のみ表示してあるが、全チャンネルで設計通りのチャンネル選択出力動作を確認した。

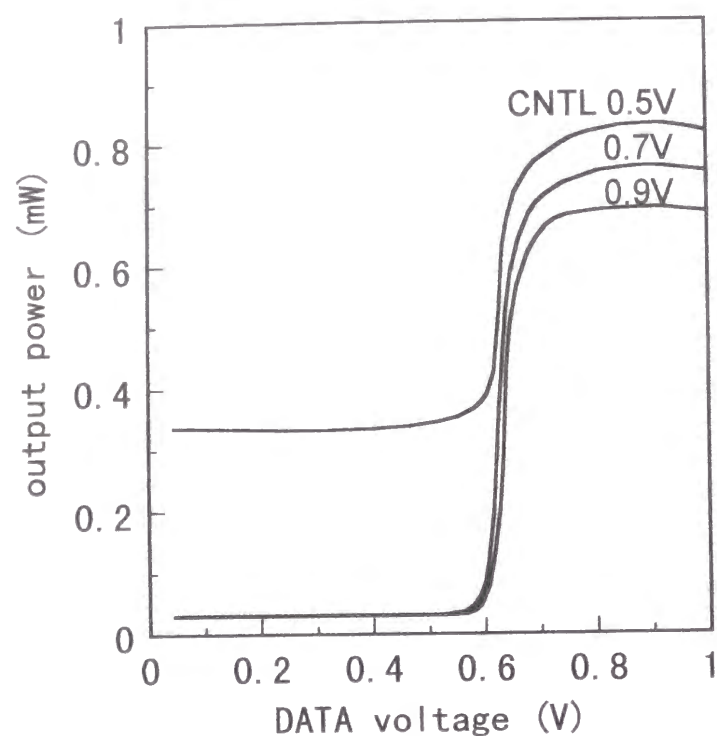


図 5.9 VCSEL 光出力のデータ電圧、コントロール電圧依存性

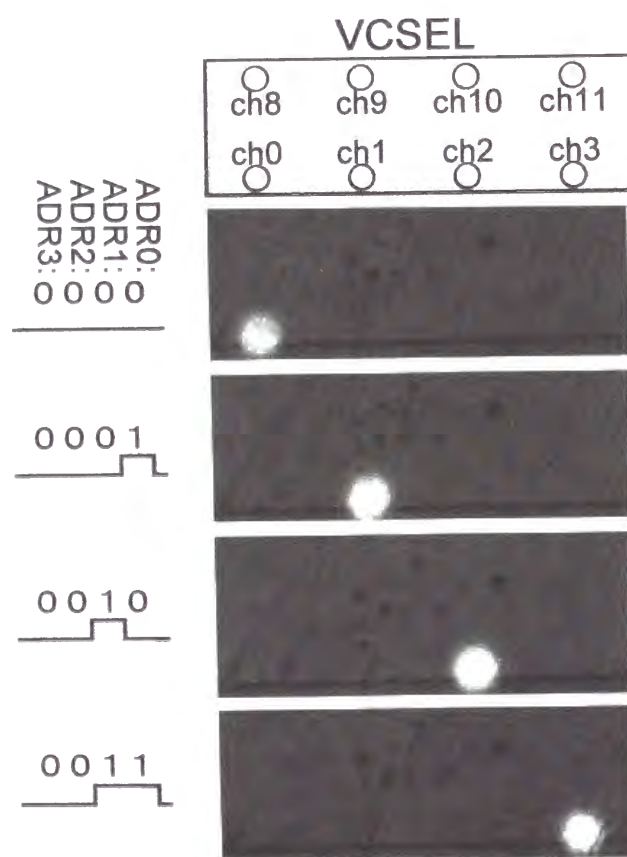


図 5.10 アドレス信号入力波形の変化による VCSEL 光出力波形の変化

5.4 伝送特性

本節では本章で提案する OCC 型 DFS の基本特性を示す上で重要となる、高周波変調信号の伝送特性について述べる

本測定では VCSEL モジュールと光クロスコネクタを直接光接続し、ポリマー導波路カプラからの光出力を InGaAs-APD (NEC 製 NDL5522PC) にて受信した。図 5.11 に 1 Gb/s の疑似乱数ビット列 (ビット長 $10^{23}-1$) で光入力信号を変調したときの伝送特性を示す。導波路カプラの中心部を通るパスと両端部を通るパスで符号誤り率特性に若干の相違があるが、パワーペナルティ 0.7 dB 以下で誤り率飽和のない良好な伝送特性が得られた。また、BER = 10^{-11} での最小受光感度は -25.0 dBm となった⁹⁸

図 5.12 に VCSEL 出力から PD 入力までの光強度変遷 (レベルダイアグラム) を示す。これより、VCSEL 出力を 0 dB に抑え、APD への結合損失を 3 dB と仮定しても、16.3 dB の損失余裕 (ロスマージン) があることがわかる。

本ロスマージンからの単純計算によると、チャンネル数を現状の 16 ch から 43 倍

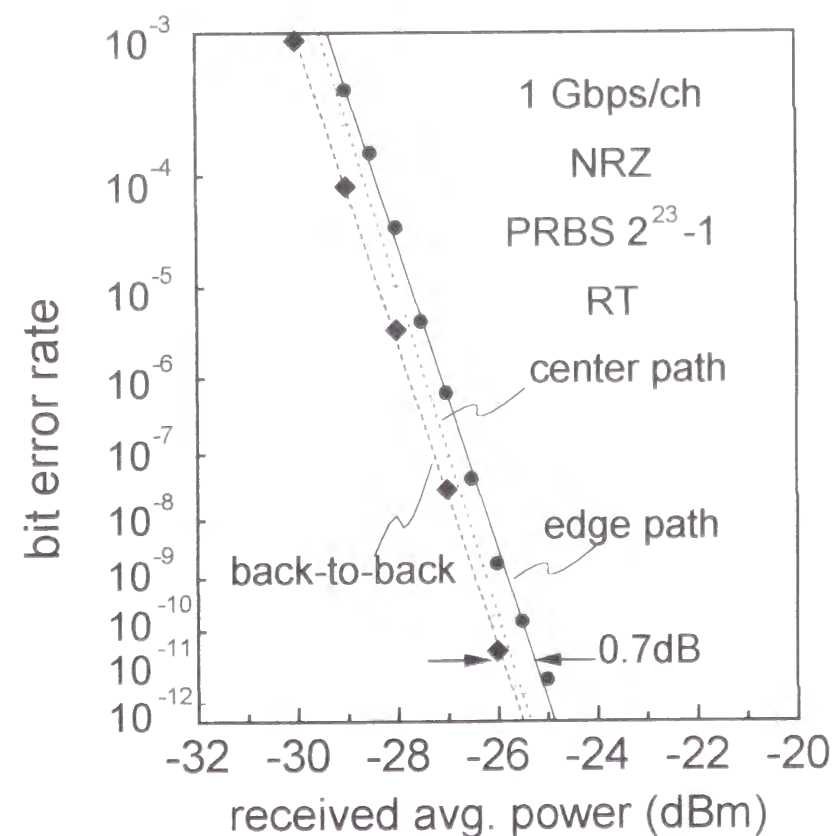


図 5.11 全体を通しての符号誤り率特性

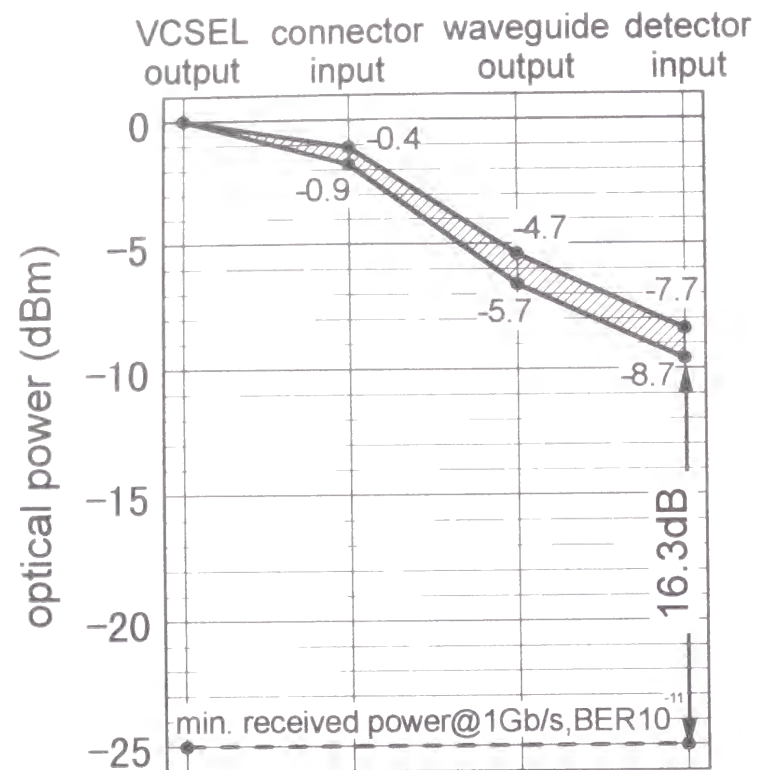


図 5.12 VCSEL から PD までのレベルダイアグラム

(16.3 dB) の 690 ch まで拡張可能となり、現状の 1 Gb/s/ch で 690 Gb/s、さらに各チャネルの伝送速度 10 Gb/s/ch にまで高めることにより 6.9 Tb/s の伝送容量を持つ大規模光スイッチが可能となる。

5.5 まとめ

本章では VCSEL の光スイッチとしての応用に着目し、その可能性を調べた。VCSEL の高集積性を生かすことにより、完全結合網型の伝送線路構成で多対多の双方向光データ伝送網が構成可能であることを初めて提案した。実際にアドレス選択型 VCSEL モジュール及びクロスコネクタを可能とする受動光素子の作製を行い、本構成が実現可能であることを示すと同時に伝送容量の限界を明らかにした。単チャネル速度を 10 Gb/s とすることにより 6.9 Tb/s の伝送容量を持つ大規模光スイッチが可能となり、第 1 章で述べた将来の伝送容量要求を十分満たすことができることを示した。本構成は網構成的には単純であるが、特に再帰的な並列演算処理を行おうとするコンピュータ応用などで重要となる。

第 6 章 結論

本論文は、垂直共振器型面発光レーザー (VCSEL) を中心として、その特性向上・特徴を生かした応用形態の創造を目的としてまとめたものである。素子寸法が波長程度と小さいことが本 VCSEL の最大の利点であるにも関わらず、このことが逆に素子抵抗の増加などの実用上重大な障害を引き起こす原因ともなり、これを解決することが本研究の最初の重要な課題であった。また、光情報処理を実現するための要素機能として出現当初から注目されながらも、実際にこれを実現することは難しく、特に最低限必要な要素機能である受光、スイッチ、メモリ機能でさえもモノリシックに集積することは困難であった。本研究ではこれらの機能を、ある程度の構造分化による妥協をしながらも、基本構造の共通化によりモノリシック構成の利点を最大限に生かす工夫を図り、その最適化を行った。さらに、コンピュータ内光データ伝送への適用を目指した超並列伝送や分散型の光スイッチをも、この VCSEL の利点を生かして実現できることを実際に試作を通して実証した。以下に、本研究で得られた主要な成果をまとめる。

第 2 章では、将来の光加入者系のみならずコンピュータ内への導入をも期待される VCSEL の特性を、真に適用可能なレベルまで引き上げるべく、素子構造を如何に最適化すればよいかを追求した。VCSEL は“微小共振器 (マイクロキャビティ)”と呼ばれるように素子寸法が全方向で波長程度であり、従来の端面発光型レーザーで行われてきた近似解析では精度が不十分である。このために、3次元有限要素法を用いた計算機解析を行い、VCSEL の 3 次元的構造解析を行った。独自の横電流注入構造により構造の最適化を行い、発振閾値電流の低減を行うとともに、素子抵抗の上昇を防ぎ、端面発光レーザーをはるかに下回る発振閾値電流と同等レベルの駆動電圧を実現した。同時に実用上重要な単一モード化によりモード不安定性を解消し、高周波変調が可能とした。これらの努力により、出現当初は端面発光レーザーに比べて決して特性の良くなかった VCSEL の真の実力を発揮させることができたものと考えられる。

第 3 章では、光データ伝送のみならず光情報処理への応用をも期待される VCSEL において、そのために必要不可欠な要素機能を付加する工夫を行った。光情報処理の実現には光機能素子をモノリシックに集積化することが必要であり、VCSEL はこれに適している。発光、受光、スイッチ、メモリ、増幅などを光情報処理に必要な

な要素機能と位置づけ、これらの機能を VCSEL を基本構造とした一つの素子に統合する工夫を行った。しかしながら、単一素子によるこれら個々の機能の特性最適化には目ずと限界があり、ある程度の機能分化を図った。具体的には、単一共振器部と二重共振器部に分け、前者で発光、スイッチとメモリ機能を、後者に受光と増幅機能を分担させ、機能強化を図った。両者とも基本構造は共通としたために、モノリシック化の利点を損なわず、同時に最適化することが可能となった。

第4章では、VCSEL の本来得意とするはずの2次元集積化を追求した。光データ伝送あるいは光情報処理への導入を容易とすべく、従来 VCSEL を使いながらも1次元アレイに留まっていた VCSEL アレイ伝送モジュールを初めて2次元アレイモジュールとすることに成功した。位置合わせを全く行うことなく、2次元アレイ状の VCSEL を一括してパッケージ上に実装でき、同じく2次元アレイ状の光ファイバと一括挿抜が可能な点が特徴である。

第5章では、光データ伝送以外の応用として VCSEL の光スイッチ応用に取り組み、VCSEL の集積性を生かした分散型光スイッチ網の提案と実証を行った。本研究は将来の半導体レーザ応用のすそ野を広げる意味で重要である。

これらの研究により、VCSEL の利点である低発振閾値と課題であった素子抵抗低減とを両立しながら、モード不安定性のない高周波変調が可能となり、光情報処理への適用時に重要な発光、受光、スイッチ、メモリ、増幅の基本要素機能をモノリシックに集積することが可能となった。これにより、従来の幹線系への光導入に留まらず、加入者系やさらに先のコンピュータ内、ボード間、チップ間等といった短距離への光導入の道を開いた。実際に VCSEL の得意とする2次元アレイ状で簡便に光導入を可能とする一括挿抜型の光伝送モジュールを試作し、その多チャンネル性を最大限生かした分散型光スイッチの提案と試作実証を行った。本研究で開発した VCSEL を取り巻く光機能素子技術は、経済効果と社会的貢献の最も大きい一般家庭への光導入に大きく貢献するものと確信している。

謝辞

本論文をまとめるに当たり終始懇切かつ丁寧なご指導、ご助言を賜りました、京都大学大学院工学研究科 電子物性工学専攻 藤田茂大 教授、松波弘之 教授、野田進助教授に心から感謝の意を表します。

本研究は筆者が日本電気株式会社 光・超高周波デバイス研究所（元 光エレクトロニクス研究所） 光基礎研究部において行われたものです。本研究の機会を頂いて頂き、多大なご指導とご鞭撻を賜った基礎研究所 小林功郎 所長（元 光エレクトロニクス研究所 所長）、東京農工大学 覧具博義 教授（元 光基礎研究部 部長）、C&C基盤事業グループ ネットワークソリューション推進本部 並木淳治 本部長（元 光基礎研究部 部長）、浅川潔 主幹研究員（元 光基礎研究部 部長）に心より感謝致します。また、本研究にあたり終始ご指導、ご助言を頂きました人事教育部 菅原健 人事マネージャー（元 光基礎研究部 部長）、光基礎研究部 杉本喜正 主任研究員に深く感謝致します。

本研究を光基礎研究部で進めるにあたり共同研究者として終始研究活動を共にし、ご指導、ご協力を頂きました、ULSIデバイス開発研究所 麻田進 フロントマネージャー（元 光基礎研究部 課長）、技術企画部 技術調査部 杉本満則 部長（元 光基礎研究部 課長）、マルチメディア推進本部 田代義春 課長（元 光基礎研究部 主任）、キャノン研究所 沼居貴陽氏（元 光基礎研究部 主任）、光基礎研究部 小倉一郎 主任、栗原香 主任、斎藤英彰 主任、山田みつきさん、栗田直氏、コンピュータ事業部 回路技術部 梶田幹浩氏（元 光基礎研究部）、職業能力開発大 河合滋 助教授（元 光基礎研究部 主任）に感謝致します。

光回路網、光実装関連でご助言を頂きましたC&Cメディア研究所 ネットワーキング研究統括 逸見直也 研究マネージャー（元 光ネットワーク研究部 課長）、山崎俊太郎 研究マネージャー（元 光ネットワーク研究部 課長）、洲崎哲行 主任研究員（元 光ネットワーク研究部 主任）、光コンポーネント研究部 長堀剛 主任、オーストラリアテレコム 鈴木修二氏（元 光ネットワーク研究部 課長）、ネットワークソリューション推進本部 西尾誠 主任（元 光ネットワーク研究部 主任）、C&Cメディア研究所 ネットワーキング研究統括 荒木壮一郎 主任（元 光コンポーネント研究部 主任）、高木和男 主任（元 光ネットワーク研究部）、チップ実装に関しご教

示頂きまし、光コンポーネン 研究部 伊藤正隆 研究マネージャー、佐々木純 主任、ドライバ回路の作製にご協力頂きまし、た超高速研究部 前多正 研究マネージャー、藤井正浩 研究マネージャー、光基礎研究部 徳島正敏 主任（元 超高速研究部 主任）、化合物デバイス事業部 厚母敬生 主任（元 超高速研究部）に心より感謝致しますまし、工場に渡りご助、ご協力頂きました伝送デバイス事業部 第一開発部 田辺尚 技術マネージャー、蔵田和彦 技術マネージャー、ファイバコネクタの作製にご協力頂きまし、エレクトロメカニカルデバイス事業部 第二技術部 粕川泰彦 エキスパートに心より感謝致します。2次元ファイバコネクタの作製でご協力いただいた住友電工 柿井俊昭氏、石田英俊氏に感謝致します。

最後に日頃から援助、協力を頂いた妻の真由美と娘の百名美に心より感謝します。

参考文献

- [1] H. Soda, K. Iga, C. Kitahara and Y. Suematsu, "GaInAsP-InP Surface emitting injection lasers," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 18, pp. 2329-2330, 1979.
- [2] S. Noda, K. Kojima, and K. Kyuma, "Mutual Injection-Locking Properties of Monolithically Integrated Surface-Emitting Multiple-Quantum-Well Distributed Feedback Lasers," IEEE J. of Quantum Electron., vol. 26, pp. 1883-1894, 1990.
- [3] S. Noda, T. Ishikawa, M. Imada, and A. Sasaki, "Surface-emitting device with embedded circular grating coupler for possible application to optoelectronic integrated devices," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 7, pp. 1397-1399, 1995.
- [4] S. Noda, T. Ishikawa, M. Imada, and A. Sasaki, "Surface-emitting device with circular grating coupler for possible application to optoelectronic integrated devices," Proc. 10th IOOC'95, TuB1-5, pp. 34-35, 1995.
- [5] S. Noda, T. Ishikawa, and A. Sasaki, "Micromachined optical circular gratings for surface light-emitting devices," Conference: 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators and Eurosensors IX. Digest of Technical Papers (IEEE Cat. No.95TH8173) Part: vol. 1, pp. 351-354, 1995.
- [6] M. Imada, S. Noda, A. Sasaki, H. Kobayashi, G. Sasaki, "Distributed feedback surface-emitting laser with air/semiconductor gratings embedded by mass-transport assisted wafer fusion technique," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 9, pp. 419-421, 1997.
- [7] 伊賀健一、小山不二夫著、「面発光レーザー」オーム社、1990.
- [8] J.L. Jewell, A. Scherer, S.L. McCall, Y.H. Lee, S. Walker, J.P. Harbison, and L.T. Florez, "Low-threshold electrically pumped vertical-cavity surface-emitting microlasers," Electron. Lett., vol. 25, pp. 123-124, 1989.
- [9] J.L. Jewell, S.L. McCall, A. Scherer, H.H. Houh, N.A. Whitaker, A.C. Gossard, and J.H. English, "Transverse modes, waveguide dispersion, and 30 ps recovery in submicron GaAs/AlAs microresonators," Appl. Phys. Lett., vol. 55, pp. 22-24, 1989.
- [10] M. Orenstein, A.C. Lehmen, C. Chang-Hasnain, N.G. Stoffel, J.P. Harbison, L.T. Florez, E. Clausen, and J.E. Jewell, "Vertical-cavity surface-emitting

InGaAs/GaAs lasers with planar lateral definition," Appl. Phys. Lett., vol. 56, pp. 2384-2386, 1990

- [11] Y.H. Lee, J.L. Jewell, A. Scherer, S.L. McCall, J.P. Harbison and L.T. Florez, "Room-temperature continuous-wave vertical cavity single-quantum-well microlaser diodes," Electron Lett., vol. 25, pp. 1377-1378, 1989.
- [12] K. Iga, F. Koyama, S. Kinoshita, "Surface Emitting Semiconductor Lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. 24, pp. 1845-1855, 1988.
- [13] F. Koyama, S. Kinoshita, and K. Iga, "Room temperature continuous wave lasing characteristics of a GaAs vertical cavity surface emitting laser," Appl. Phys. Lett., vol. 55, pp. 221, 1989.
- [14] R.H. Yan, R.J. Simes, L.A. Coldren, "Analysis and Design of Surface-Normal Fabry-Perot Electrooptic Modulators," IEEE J. Quantum Electron, vol. 25, pp. 2272-2280, 1989.
- [15] R.H. Yan, R.J. Simes, L.A. Coldren, "Extremely Low-Voltage Fabry-Perot Reflection Modulators," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 2, pp. 118-119, 1990.
- [16] R.S. Geels, S.W. Corzine, J.W. Scott, D.B. Young, and L.A. Coldren, "Low threshold planarized vertical cavity surface emitting lasers," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 2, pp. 234-236, 1990.
- [17] J.L. Jewell, J.P. Harbison, A. Scherer, Y.H. Lee, and L.T. Florez, "Vertical-cavity surface-emitting lasers: design, growth, fabrication, characterization," IEEE Quantum Electron., vol. 27, pp. 1332-1346, 1991.
- [18] R.S. Geels, S.W. Corzine, and L.A. Coldren, "InGaAs vertical-cavity surface-emitting lasers," IEEE Quantum Electron., vol. 27, pp. 1359-13467 1991.
- [19] C.J. Chang-Hasnain, H.P. Harbison, C.-E. Zah, M.W. Maeda, L.T. Florez, N.G. Stoffel, and T.-P. Lee, "Multiple wavelength tunable surface-emitting laser arrays," IEEE Quantum Electron., vol. 27, pp. 1368-1376, 1991.
- [20] G. Hasnain, K. Tai, L. Yang, Y.H. Wang, R.H. Fisher, J.D. Wynn, B. Weir, N.K. Dutta, and A.Y. Cho, "Performance of gain-guided surface emitting lasers with semiconductor distributed Bragg reflectors," IEEE Quantum Electron., vol. 27, pp. 1377-1385, 1991.

- [21] A. Ibaraki, K. Furukawa, T. Ishikawa, K. Yodoshi, T. Yamaguchi, and T. Niina, "GaAs buried heterostructure vertical cavity top-surface emitting laser," IEEE Quantum Electron., vol. 27, pp. 1386-1390, 1991.
- [22] W. Nakwaski and M. Osinski, "Thermal properties of etched-well surface-emitting semiconductor lasers," IEEE Quantum Electron., vol. 27, pp. 1391-1401, 1991.
- [23] C.J. Chang-Hasnain, J.P. Harbison, G. Hasnain, A.C. Von Lehmen, L.T. Florez, and N.G. Stoffel, "Dynamic, polarization, and transverse mode characteristics of vertical cavity surface-emitting lasers," IEEE Quantum Electron., vol. 27, pp. 1402-1409, 1991.
- [24] F. Koyama, K. Morito, and K. Iga, "Intensity noise and polarization stability of GaAlAs-GaAs surface emitting lasers," IEEE Quantum Electron., vol. 27, pp. 1410-1416, 1991.
- [25] L.G. Melcer, J.R. Karin, R. Nagarajan, and J.E. Bowers, "Picosecond dynamics of optical gain switching in vertical cavity surface emitting lasers," IEEE Quantum Electron., vol. 27, pp. 1417-1425, 1991.
- [26] H. Kosaka and K. Kasahara, "VCSELs: Requirements and Performance Improvements for Optical Interconnects," in Proc. 7th LEOS'94, SL5.1, pp. 259-260, 1994.
- [27] M. Orenstein, A.C. Von Lehmen, C. Chang-Hasnain, N.G. Stoffel, J.P. Harbison, and L.T. Florez, "Matrix addressable vertical cavity surface emitting laser array," Electron Lett., vol. 27, pp. 437-438, 1991.
- [28] R. A. Morgan, K. C. Robinson, L. M. F. Chirovsky, M. W. Focht, G.D. Guth, R. E. Leibenguth, K. G. Glogovsky, G. J. Przybylek, and L. E. Smith, "Uniform 64x1 arrays of individually-addressed vertical cavity topsurface emitting lasers," Electron Lett., vol. 27, pp. 1400-1401, 1991.
- [29] D. Tauber, G. Wang, R. S. Geels, J. E. Bowers, and L. A. Coldren, "Large and small signal dynamics of vertical cavity surface emitting lasers," Appl. Phys. Lett., vol. 62, pp. 325-327, 1993.
- [30] J. L. Jewell, S. L. McCall, A. Scherer, H. H. Houh, N. A. Whitaker, A. C. Gossard, and J. H. English, "Transverse modes, waveguide dispersion, and 30 ps recovery in

submicron GaAs/AlAs microresonators," *Appl. Phys. Lett.*, vol.55, pp.22-24, 1989.

- [31] C. J. Chang Hasnain, M. Orenstein, A. Von Lehmen, L. T. Florez, J. P. Harbison, and N. G. Stoffel, "Transverse mode characteristics of vertical cavity surface emitting lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 57, pp.218-220, 1990.
- [32] K. Kurihara, T. Numai, I. Ogura, A. Yasuda, M. Sugimoto, and K. Kasahara, "Reduction in the series resistance of the distributed Braggreflector in vertical cavities by using quasi-graded superlattices at the heterointerfaces," *J. of Appl. Phys.*, vol. 73, pp. 21-27, 1993.
- [33] Y. H. Lee et al., J. L. Jewell, B. Tell, K. F. Brown-Goebeler, A. Scherer, J. P. Harbison, L. T. Florez, "Effects of etch depth and ion implantation on surface emitting microlasers," *Electron. Lett.*, vol. 26, pp.225-227, 1990.
- [34] M. Sugimoto, I. Ogura, H. Saito, A. Yasuda, K. Kurihara, H. Kosaka, T. Numai, and K. Kasahara, "Surface emitting devices with distributed Bragg reflectors grown by highly precise molecular beam epitaxy," *J. of Crystal Growth*, vol. 127, pp. 1-4, 1993.
- [35] R. S. Geels, S. W. Corzine, and L. A. Coldren, "InGaAs vertical-cavity surface-emitting lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, pp. 1359-1367, 1991.
- [36] T. Numai, M. Sugimoto, I. Ogura, H. Kosaka, and K. Kasahara, "Surface-emitting laser operation in vertical-to-surface transmission electrophotonic devices with a vertical cavity," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 58, pp. 1250-1252, 1990.
- [37] H. Kosaka, I. Ogura, T. Numai, M. Sugimoto, and K. Kasahara, "Dependence of Laser Characteristics on Distributed Bragg Reflector Pairs in Vertical-to Surface Transmission Electrophotonic Devices," *Electron. Lett.*, vol. 28, pp. 1524-1525, 1992.
- [38] H.C. Casey and M.B. Panish, *Heterostructure Lasers. Part A*. New York: Academic. (1978) 175.
- [39] S. Adachi, *GaAs and Related Materials*, World Scientific, pp. 439-452.
- [40] C.J. Chang Hasnain, C.E. Zah, G. Hasnain, J.P. Harbison, L.T. Folrez, N.G. Stoffel and T.P. Lee, "Dynamic characteristics of vertical cavity surface emitting lasers," *IEEE Lasers and Electro Optics Society (LEOS), SDL1.8/MKK8*, 1990
- [41] 理科年表
- [42] T. Numai, K. Kurihara, I. Ogura, H. Kosaka, M. Sugimoto, and K. Kasahara, "High

Electronic-Optical Conversion Efficiency in a Vertical-to-Surface Transmission Electro-Photonic Device with a Vertical Cavity," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 5, pp. 136-138, 1993.

- [43] H. Kosaka, K. Kurihara, A. Uemura, T. Yoshikawa, I. Ogura, T. Numai, M. Sugimoto, and K. Kasahara, "Uniform Characteristics with Low Threshold and High Efficiency for a Single-Transverse-Mode Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser-Type Device Array," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 6, pp. 323-325, 1994.
- [44] K. Kurihara, H. Kosaka, T. Kawakami, T. Yoshikawa, H. Saitoh, M. Kajita, A. K. Dutta, I. Ogura, Y. Sugimoto, and K. Kasahara, "High Performance Vertical-Cavity Surface Emitting Lasers in Overall Characteristics," in *Proc. 10th IOOC'95*, 1995, TuB1-2, pp. 28-29.
- [45] M. Kajita, T. Kawakami, M. Nido, A. Kimura, T. Yoshikawa, K. Kurihara, Y. Sugimoto, and K. Kasahara, "Temperature characteristics of a vertical-cavity surface-emitting laser with a broad-gain bandwidth," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 1, pp. 654-660, 1995.
- [46] M. Kajita, K. Kurihara, H. Saito, T. Yoshikawa, Y. Sugimoto, and K. Kasahara, "Temperature-insensitive vertical-cavity surface-emitting laser array with a broad gain bandwidth," *Electron. Lett.*, vol. 31, pp. 1925-1926, 1995.
- [47] S. Asada, H. Kosaka, K. Kurihara, T. Ishida, and Y. Koizumi, "Analysis and Simulation for Opto-electronics Devices," *NEC Research & Development*, vol. 33, pp. 501-517, 1992.
- [48] T. Yoshikawa, H. Kosaka, K. Kurihara, M. Kajita, Y. Sugimoto, and K. Kasahara, "Complete polarization control of 8x8 vertical-cavity surface-emitting laser matrix arrays," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 66, pp. 908-910, 1995.
- [49] F. S. Choa, Y. H. L. Lee, T. L. Koch, C. A. Burrus, B. Tell, J. L. Jewell, and R. E. Leibenguth, "High-Speed Modulation of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 3, pp. 697-699, 1991.
- [50] T. G. Dziura, Y. J. Yang, R. Fernandez, and S. C. Wang, "5 GHz modulation of a mushroom mesa surface emitting laser," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 59, pp. 1147-1149, 1991.

- [51] B. Moller, E. Zeeb, T. Hackbarth, and K. J. Ebeling, "High Speed Performance of 2-D Vertical-Cavity Laser Diode Arrays," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 6, pp. 1056-11058, 1994
- [52] A. Karlsson, R. Schatz, and G. Bjork, "On the Modulation Bandwidth of Semiconductor Microcavity Lasers," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 6, pp. 1312-1314, 1994.
- [53] J. W. Scott, B. J. Thibeault, C. J. Mahon, and L. A. Coldren, "High modulation efficiency of intracavity contacted vertical cavity lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 65, pp. 1483-1485, 1994.
- [54] U. Fiedler, G. Reiner, P. Schnitzer, and K. J. Ebeling, "Top surface-emitting vertical-cavity laser diodes for 10-Gb/s data transmission," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, pp. 746-748, 1996.
- [55] H. Ishii, Y. Tomori, Y. Yoshikuni, T. Tamamura, Y. Kondo, "Multiple-phase-shift super structure grating DBR laser for broad wavelength tuning," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 5, pp. 613-615, 1993.
- [56] K. Kasahara Y. Tashiro, N. Hamao, M. Sugimoto, and T. Yanase, "Double heterostructure optoelectronic switch as a dynamic memory with low-power consumption," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 52, p. 679, 1988.
- [57] K. Kasahara Y. Tashiro, I. Ogura, M. Sugimoto, S. Kawai, and K. Kubota, "Vertical to surface transmission electro-photon device for the application of optical interconnection and processing," in *Extended Abstracts of the International Conference on Solid State Devices and Materials (1989)*, p. viii+604, 433-6.
- [58] I. Ogura, T. Numai, H. Kosaka, M. Sugimoto, Y. Tashiro, and K. Kasahara, "A novel optical self-routing switch with a wavelength filtering function using a vertical to surface transmission electro-photon device," in *Extended Abstracts of the International Conference on Solid State Devices and Materials (1990)*, D-3-5.
- [59] I. Ogura, Y. Tashiro, S. Kawai, K. Yamada, M. Sugimoto, K. Kubota, and K. Kasahara, "Reconfigurable optical interconnection using a two-dimensional vertical to surface transmission electrophotonic device array," *Appl. Phys. Lett.* vol. 57, pp. 540-

542, 1990.

- [60] D.A.B Miller, D.S. Chemla, T.C. Damen, A.C. Gossard, W. Wiegmann, T.H. Wood, and C.A. Burrus, "Novel hybrid optically bistable switch: the quantum well self-electro-optic effect device," *Appl. Phys. Lett.* vol. 45, pp. 13-15, 1984
- [61] D.A.B. Miller, J.E. Henry, A.C. Gossard, and J.H. English, "Integrated quantum well self-electro-optic effect device: 2x2 array of optically bistable switches," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 49, pp. 821-823, 1986.
- [62] G. Livescu, D.A.B. Miller, J.E. Henry, A.C. Gossard, and J.H. English, "Spatial light modulator and optical dynamic memory using a 6x6 array of self-electro-optic effect devices," *Optics Lett.*, vol. 13, pp. 297-299, 1988.
- [63] A.L. Lentine, H.S. Hinton, D.A.B. Miller, J.E. Henry, J.E. Cunningham, and L.M.F. Chirovsky, "Symmetric self-electrooptic effect device: optical set-reset latch, differential logic gate, and differential modulator/detector," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 25, pp. 1928-1989, 1989.
- [64] A.L. Lentine, F.B. McCormick, R.A. Novotny, L.M.F. Chirovsky, L.A.D. D'Asaro, R.F. Kopf, J.M. Kuo, and G.D. Boyd, "A 2 Kbit array of symmetric self electrooptic effect devices," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 2, pp. 51-53, 1990.
- [65] C. Amano, S. Matsuo, and T. Kurokawa, "Novel photonic switch arrays consisting of vertically integrated multiple-quantum-well reflection modulators and phototransistors: exciton absorptive reflection switch," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, pp. 736-738, 1991.
- [66] S. Noda, Y. Kobayashi, and A. Sasaki, "Internal optical couplings and functions of vertically and directly integrated device of four phototransistors and a laser diode," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, pp. 1142-1144, 1992
- [67] S. Noda, K. Shibata, and A. Sasaki, "Light-to-light transducers integrated with heterojunction phototransistors and a laser diode," *Sensors and Actuators A (Physical)*, vol. A40, pp. 125-130, 1994.
- [68] S. Noda, Y. Kobayashi, K. Shibata, and A. Sasaki, "optoelectronic integrated tristable device with optically controlled set and reset functions," *IEEE J. of Quantum Electron.*, vol. 31, pp. 1465-1473, 1995.

- [69] V. Ahmadi, S. Noda, and S. Sasaki, "2-D simulation and new structures of heterojunction phototransistor for higher optical amplification in optoelectronic integrated devices," *Optical Review*, vol. 2, pp. 120-122, 1995.
- [70] V. Ahmadi, S. Noda, K. Shibata, and A. Sasaki, "Optical multi-stable set-reset functions of optoelectronic integrated device composed of six heterojunction phototransistors over two laser diodes," *Solid-State Electronics*, vol.38, pp. 551-556, 1995.
- [71] Y. Zhu, S. Noda, and A. Sasaki, "Theoretical-Analysis of Transient-Behavior of Optoelectronic Integrated Devices," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 42, pp. 646-651, 1995.
- [72] V. Ahmadi, S. Noda, and S. Sasaki, "Analysis for relative intensity noise of optoelectronic integrated device by heterojunction phototransistor and laser diode," *Solid-State Electronics*, vol. 41, pp. 465-471, 1997.
- [73] K. Kasahara, Y. Tashiro, N. Hamao, M. Sugimoto, and T. Yanase, "Double heterostructure optoelectronic switch as a dynamic memory with low power consumption," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 52, pp. 679-681, 1988.
- [74] Y. Tashiro, N. Hamao, M. Sugimoto, N. Takado, S. Asada, and K. Kasahara, "Vertical to surface transmission electrophotonic device with selectable output light channels," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 54, pp. 329-331, 1989.
- [75] M. Sugimoto, N. Hamao, K. Nishi, and H. Yokoyama, "Indium Composition Dependent Threshold current Density in Strained InGaAs/AlGaAs Quantum Well Lasers," in *Proc. LEOS'90 (1990)*, AOD8.4, pp. 635-636.
- [76] I. Ogura, H. Kosaka, T. Numai, M. Sugimoto, and K. Kasahara, "Cascadable optical switching characteristics in vertical-to-surface transmission electrophotonic devices operated as vertical cavity lasers", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 60, pp. 799-801, 1992.
- [77] I. Bar-Joseph, C. Klingshirn, D.A.B. Miller, D.S. Chemla, U. Koren and B.I. Miller, "Quantum-confined Stark effect in InGaAs/InP quantum wells grown by organometallic vapor phase epitaxy," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 50, pp. 1010-1012, 1987.
- [78] S. Tarucha, Y. Horikoshi, and H. Okamoto, "Optical Absorption Characteristics of

GaAs-AlGaAs Multi-Quantum-Well Heterostructure Waveguides," *Jpn J Appl Phys.* vol. 22, L482-484, 1983

- [79] S. Tarucha, H. Kobayashi, Y. Horikoshi, and H. Okamoto, "Carrier Induced Energy-Gap Shrinkage in Current-Injection GaAs/AlGaAs MQW Heterostructures," *Jpn J Appl. Phys.*, vol. 23, pp. 874-878, 1984.
- [80] S. Tarucha and H. Okamoto, "Monolithic integration of a laser diode and an optical waveguide modulator having a GaAs/AlGaAs quantum well double heterostructure," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 48, pp. 1-3, 1986.
- [81] D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, A. C. Gossard, W. Wiegmann, T. H. Wood and C. A. Burrus, "Band-Edge Electroabsorption in Quantum Well structures The Quantum-Confined Stark Effect," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 53, pp. 2173-2176, 1984
- [82] G. Lengyel, K.W. Jelley, and R.W.H. Engelmann, "A Semi-empirical Model for Electroabsorption in GaAs/AlGaAs Multiple Quantum Well Modulator Structures," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 26, pp. 296-304, 1990.
- [83] M. Whitehead, A. Rivers, G. Parry, J. S. Roberts and C. Button, "Low-voltage multiple quantum well reflection modulator with on:off ratio $> 100:1$," *Electron. Lett.* vol. 25, pp. 984-985, 1989.
- [84] R.H. Yan, R.J. Simes, L.A. Coldren, "Analysis and Design of Surface-Normal Fabry-Perot Electrooptic Modulators," *IEEE J. Quantum Electron*, vol. 25, pp. 2272-2280, 1989.
- [85] M. S. Ünlü, K. Kishino, J.-I. Chyi, L. Arsenault, J. Reed, S. Noor Mohammad and H. Morkoç, "Resonant cavity enhanced AlGaAs/GaAs heterojunction phototransistors with an intermediate InGaAs layer in the collector," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 57, pp. 750-752, 1990.
- [86] M. Lebby, C. A. Gaw, W. Jiang, P. A. Kiely, C. L. Shieh, P. R. Claisse, J. Ramadani, D. H. Hartman, D. B. Schwartz, and J. Grula, "Use of VCSEL Arrays for Parallel Optical Interconnects," in *Proc. SPIE, Fabrication, Testing, and Reliability of Semiconductor Lasers*, vol. 2683, pp. 81-91, 1996.
- [87] W. S. Ishak, K. H. Hahn, B. L. Booth, C. Mueller, A. A. J. Levi, and R. Craig, "Optical Interconnects - The POLO Approach," in *Proc. SPIE, Optoelectronic*

Interconnects III, vol. 2400, pp. 214-221, 1995.

- [88] K.H. Hahn, K.S. Giboney, R.E. Wilson, J. Stranznicky, E.G. Wong, M.R. Tan, R.T. Kaneshiro, D.W. Dolfi, E.H. Mueller, A.E. Plotts, D.D. Murray, J.E. Marchegiano, B.L. Booth, B.J. Sano, B. Madhaven, G. Raghavan, and A.F.J. Levi: 'Gigabyte/s data communications with the POLO parallel optical link'. Proc. 46th ECTC'96, pp.301-307
- [89] S. Swirhun, M. Dudek, R. Neumann, J. Calkins, P. Brusenbach, D. Brinkmann, T. Northrop, A. Moore, D. Paananen, J. Scott, and T. White, "The P-VixeLink multichannel optical interconnect," in Proc. ECTC '96, 1996, pp. 316-326.
- [90] Y. M. Won, D. J. Muehlner, C. C. Faudskar, D. B. Buchholz, M. Fishteyn, J. L. Brandner, W. J. Parzygnat, R. A. Morgan, T. Mullally, R. E. Leibenguth, G. D. Guth, M. W. Focht, K. G. Glogovsky, J. L. Zilko, J. V. Gates, P. J. Anthony, B. H. Tyrone, T. J. Ireland, D. H. Lewis, D. F. Smith, S. F. Nati, D. K. Lewis, D. L. Rogers, H. A. Aispain, S. M. Gowda, S. G. Walker, Y. H. Kwark, R. J. S. Bates, D. M. Kuchta, and J. D. Crow, "Technology development of a high-density 32-channel 16-Gb/s optical data link for optical interconnection applications for the optoelectronic technology consortium (OETC)," J. Lightwave Technol., vol. 13, pp. 995-1016, 1995.
- [91] H. Kosaka, M. Kajita, M. Yamada, Y. Sugimoto, K. Kurata, T. Tanabe, and Y. Kasukawa, "2D alignment-free VCSEL-array module with a push/pull fibre connector," Electron. Lett., vol. 32, pp. 1991-1992, 1996.
- [92] H. Ishida, K. Sakai, and T. Kakii, "Two-dimensionally arranged 24-fiber optical connectors", in Proc. OFC'97, 1997, WL28, pp. 189-190.
- [93] M. Kajita, H. Kosaka, M. Yamada, Y. Sugimoto, K. Kurata, and T. Tanabe, "1-Gb/s Modulation characteristics of a vertical-cavity surface-emitting laser array module," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 9, pp. 146-148, 1997.
- [94] H. Kosaka, M. Kajita, Y. Li, and Y. Sugimoto, "A Two-dimensional Optical Parallel Transmission using a Vertical-cavity Surface-emitting Laser Array Module and an Image Fiber," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 9, pp.253-255, 1997.
- [95] A. Komiyama and M. Hashimoto, "Crosstalk observed on the background of the

transmitted edge through a short image fiber," in Proc. 4th Japan-China Joint Meeting on OFSET, 1993.

- [96] H. Kosaka, A. K. Dutta, K. Kurihara, Y. Sugimoto, and K. Kasahara, "Giga-bit-rate optical signal transmission using vertical-cavity surface-emitting lasers with large-core plastic-cladding fibers," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 7, pp. 926-928, 1995
- [97] I. Redmond, E. Schenfeld et al., in Proc. OC'94, pp. 241-242, and 373-374, Aug., 1994.
- [98] H. Kosaka, M. Kajita, M. Yamada, Y. Sugimoto, K. Kurata, and T. Tanabe, "A 16x16 Optical Full-Crossbar Connection Module with VCSEL-Array Push-pull Module and Polymer-waveguide Coupler Connector," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 9, pp. 244-246, 1997.
- [99] H. Kosaka, M. Kajita, T. Yoshikawa, Y. Sugimoto, and K. Kasahara, "Optical cross connectors for distributed fiber switches," in Proc. 8th LEOS'95, 1995, OIPS3.3, pp. 187-188.

本研究に関連する発表

* : 本論文に内容を含むもの

学術論文 (主著書)

- [1] *H. Kosaka, K. Kurihara, M. Sugimoto, and K. Kasahara, "Detector Characteristics of a Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser," Jpn. J. of Appl. Phys. vol. 30, pp. L1172-L1174, 1991.
- [2] *H. Kosaka, I. Ogura, T. Numai, M. Sugimoto, and K. Kasahara, "DEPENDENCE OF LASER CHARACTERISTICS ON DISTRIBUTED BRAGG REFLECTOR PAIRS IN VERTICAL-TO-SURFACE TRANSMISSION ELECTROPHOTONIC DEVICES," Electron Lett., vol 28, pp. 1524-1525, 1992.
- [3] *H. Kosaka, I. Ogura, M. Sugimoto, H. Saito, T. Numai, and K. Kasahara, "Pixels Consisting of Double Vertical-Cavity Detector and Single Vertical-Cavity Laser Sections for 2-D Bidirectional Optical Interconnections," Jpn. J. of Appl. Phys. vol. 32, pp. 600-603, 1993.
- [4] *H. Kosaka, I. Ogura, H. Saito, M. Sugimoto, K. Kurihara, T. Numai, and K. Kasahara, "Pixels Consisting of a Single Vertical-Cavity Laser Thyristor and a Double Vertical-Cavity Phototransistor," IEEE Photon. Tech. Lett., vol. 5, pp. 1409-1411, 1993.
- [5] *H. Kosaka, K. Kurihara, A. Uemura, T. Yoshikawa, I. Ogura, T. Numai, M. Sugimoto, and K. Kasahara, "Uniform Characteristics with Low Threshold and High Efficiency for a Single-Transverse-Mode Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser-Type Device Array," IEEE Photon. Tech. Lett., vol. 6, pp. 323-325, 1994.
- [6] *H. Kosaka, A. K. Dutta, K. Kurihara, Y. Sugimoto, and K. Kasahara, "Gigabit-rate Optical-Signal Transmission Using Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers with Large-Core Plastic-Cladding Fibers," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 7, pp. 926-928, 1995.
- [7] *H. Kosaka, M. Kajita, M. Yamada, Y. Sugimoto, K. Kurata, T. Tanabe, and Y. Kasukawa, "2D alignment free VCSEL-array module with push/pull fibre connector," Electron. Lett., vol. 32, pp.1991-1992, 1996.
- [8] *H. Kosaka, M. Kajita, Y. Li, Y. Sugimoto, "A Two-

dimensional Optical Parallel Transmission using a Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Array Module and an Image Fiber," IEEE Photon. Technol. Lett., vol 9, pp 253-255, 1997.

- [9] *H. Kosaka, M. Kajita, M. Yamada, Y. Sugimoto, K. Kurata, and T. Tanabe, "A 16×16 Optical Full-Cross-bar Connection Module with VCSEL-Array Push/pull Module and Polymer-waveguide Coupler Connector," IEEE Photon. Technol. Lett., vol 9, pp 244-246, 1997.
- [10] *H. Kosaka, "Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser and Its Applications for Optical Interconnection and Switch," Jpn. J. of Appl. Phys., vol. 37, pp 1394-1399, 1998
- [11] *H. Kosaka, M. Kajita, Y. Sugimoto, " Multidimensional VCSEL-Array Push/pull Module Fabricated Using the Self-Alignment Mounting Technique," IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology-Part B, vol. 21, pp. 1-9, 1998.
- [12] *H. Kosaka, "Smart integration and packaging of 2D VCSELs for high-speed parallel links," J. Selected Topics in Quantum Electron., in printing.

学術論文 (共著書)

- [13] T. Numai, M. Sugimoto, I. Ogura, H. Kosaka, and K. Kasahara, "Surface-emitting laser operation in vertical-to-surface transmission electrophotonic devices with a vertical cavity," Appl. Phys. Lett., vol. 58, pp. 1250-1252, 1990
- [14] T. Numai, I. Ogura, H. Kosaka, M. Sugimoto, Y. Tashiro, and K. Kasahara, "Optical self-routing switch using vertical to surface transmission electrophotonic deices with transmission light amplification function," Electron. Lett., vol. 27, pp. 605-606, 1991
- [15] I. Ogura, H. Kosaka, T. Numai, M. Sugimoto, and K. Kasahara, "Cascadable optical switching characteristics in vertical-to-surface transmission electrophotonic devices operated as vertical cavity lasers," Appl. Phys. Lett., vol 60, pp. 799-801, 1991
- [16] S. Asada, H. Kosaka, K. Kurihara, T. Ishida, and Y. Koizumi, "Analysis and Simulation for Opto-electronics Devices," NEC Research & Development, vol. 33, pp. 501-517, 1992.
- [17] K. Kurihara, T. Numai, I. Ogura, H. Kosaka, M. Sugimoto, and K. Kasahara, "Double-

- Mesa-Structure Vertical-to-Surface Transmission Electro-Photonic Device with a Vertical Cavity,” Jpn. J. Appl. Phys., vol.32, pp.604-608, 1993.
- [18] T. Numai, K. Kurihara, I. Ogura, H. Kosaka, M. Sugimoto, and K. Kasahara, “High Electronic-Optical Conversion Efficiency in a Vertical-to-Surface-Transmission Electro-Photonic Device with a Vertical Cavity,” IEEE Photon. Tech. Lett., vol. 5, pp. 136-138, 1993.
- [19] M. Sugimoto, I. Ogura, H. Saito, A. Yasuda, K. Kurihara, H. Kosaka, T. Numai, and K. Kasahara, “Surface emitting devices with distributed Bragg reflectors grown by highly precise molecular beam epitaxy,” J. of Crystal Growth, vol. 127, pp. 1-4, 1993.
- [20] K. Kurihara, T. Numai, H. Kosaka, I. Ogura, M. Sugimoto, and K. Kasahara, “Determination of Power Reflectivity of Quasi-Graded Distributed Bragg Reflectors Using Stopband Width,” IEEE Photon. Tech. Lett., vol. 5, pp. 334-336, 1993.
- [21] M. Kajita, T. Kawakami, K. Kurihara, T. Yoshikawa, H. Saito, Y. Sugimoto, M. Sugimoto, H. Kosaka, I. Ogura, and K. Kasahara, “Temperature Analysis of Laser-Emission Surface-Normal Optical Devices with a Vertical Cavity,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 33, pp. 859-863, 1994.
- [22] H. Saito, H. Kosaka, M. Sugimoto, I. Ogura, and K. Kasahara, “Integration of vertical-cavity surface-emitting devices by molecular beam epitaxy regrowth,” J. of Vacuum Science & Technol. B, vol. 12, pp. 2905-2909, 1994.
- [23] T. Numai, K. Kurihara, K. Kuhn, H. Kosaka, I. Ogura, M. Kajita, H. Saito, and K. Kasahara, “Control of Light-Output Polarization for Surface-Emitting-Laser Type Device by Strained Active Layer Grown on Misoriented Substrate,” IEEE J. of Quantum Electron., vol. 31, pp. 636-643, 1995.
- [24] T. Yoshikawa, H. Kosaka, M. Kajita, K. Kurihara, Y. Sugimoto, and K. Kasahara, “Alternately perpendicular polarization in chequer-pattern matrix arrays of VCSELs,” Electron. Lett., vol. 31, pp. 1573-1574, 1995.
- [25] T. Yoshikawa, H. Kosaka, K. Kurihara, M. Kajita, Y. Sugimoto, and K. Kasahara, “Complete polarization control of 8x8 vertical-cavity surface-emitting laser matrix arrays,” Appl. Phys. Lett., vol. 66, pp. 908-910, 1995.
- [26] H. Saito, H. Kosaka, Y. Sugimoto, and K. Kasahara, “Integration of single / double vertical-cavity devices by mask molecular beam epitaxy,” J. of Crystal Growth, vol. 150, pp. 1318-1322, 1995.
- [27] Y. Li, T. Wang, H. Kosaka, S. Kawai, and K. Kasahara, “Fiber-image-guide-based bit-parallel optical interconnects,” Appl. Opt. 35, 6920-6933, 1996.
- [28] M. Kajita, H. Kosaka, M. Yamada, Y. Sugimoto, K. Kurata, and T. Tanabe, “1-Gb/s Modulation characteristics of a vertical-cavity surface-emitting laser array module,” IEEE Photon. Technol. Lett, vol. 9, pp.146-148, 1997.

国際学会（主著書）

- [29] *H. Kosaka, I. Ogura, M. Sugimoto, H. Saito, T. Numai, and K. Kasahara, “Pixels Consisting of Double Vertical-Cavity Detector and Single Vertical-Cavity Laser Sections for 2-D Bidirectional Optical Interconnections,” in Extended Abstracts of the International Conference on Solid State Devices and Materials (1992), B-5-2, pp. 595-597.
- [30] *H. Kosaka, I. Ogura, H. Saito, M. Sugimoto, K. Kurihara, T. Numai, and K. Kasahara, “Pixels Consisting of a Single Vertical-Cavity Laser-Thyristor and a Double Vertical-Cavity Phototransistor,” in Proc. Quantum Optoelectronics, QThA3-1, pp. 56-59, 1993.
- [31] *H. Kosaka and K. Kasahara, “VCSELs: Requirements and Performance Improvements for Optical Interconnects,” in Proc. 7th LEOS’94, SL5.1, pp. 259-260, 1994.
- [32] *H. Kosaka, M. Kajita, T. Yoshikawa, Y. Sugimoto, and K. Kasahara, “Optical cross connectors for distributed fiber switches,” in Proc. 8th LEOS’95, OIPS3.3, pp. 187-188, 1995.
- [33] *H. Kosaka, M. Kajita, M. Yamada, Y. Sugimoto, K. Kurata, T. Tanabe, and Y. Kasukawa, “Plastic-based Receptacle-type VCSEL-array Modules with One and Two Dimensions fabricated using the Self-alignment Mounting Technique”, in Proc. ECTC’97, Session10-5, pp.382-390, 1997.
- [34] *H. Kosaka, “VCSEL and Its Applications for Optical Interconnection and Switch,” in Extended Abstracts of the International Conference on Solid State Devices and Materials (1997), C-2-3, pp. 58-5.

国内学会（主著書抜粋）

- [35] *小坂、沼居、小倉、栗原、吉原、山中、杉本、笠原、「面入出力光電融合素子(VSTEP)の高性能化とその光接続・光信号処理への応用」、Proc. OQE90-159, pp.67-72, 1991.
- [36] *小坂、栗原、梶田、吉川、A. K. Dutta、杉本、笠原、「面発光レーザー及び大口径PCFファイブーブルファイバを用いた高速光データリンク」, Proc. OPE95-31, LQE95-35, pp.7-12, 1995.
- [37] *小坂、栗原、梶田、吉川、A. K. Dutta、杉本、笠原、「面発光レーザー及び大口径PCFファイブーブルファイバを用いた高速光データリンク」, Proc. ED95-59, OPE95-31, LQE95-31, pp.7-12, 1995.
- [38] *小坂、梶田、杉本、「面発光レーザー2次元アレイ無調芯実装フッシュフル型エッジエミッタ」, Proc. IQF96-144, pp.7-12, 1997.